# 无线传感器网络应用简单 Reed-Solomon 编码的 低能耗和低时延可靠数据收集方案

# 朱艺华 徐 骥 田贤忠 池凯凯

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘 要 无线传感器网络的数据链路层和物理层通常采用低功率低数据率的 IEEE 802.15.4 标准,其节点由能量 极为有限的电池供电,且无线链路易丢包,而且在无线传感器网络的一些应用中,需要在给定的时间内将数据汇 集到基站,因此,设计一种节能、低时延且可靠的数据收集方案对无线传感器网络的应用极为重要.文中利用 Reed-Solomon (RS)编码以提高数据传递可靠性,致力于将能耗、数据收集率、数据收集时延、数据包编码方案整合 为一个优化问题;给出了简单 RS 码字即 S-RS 码字集合,证明了该码字集合中任何 n 个码字是线性独立的;详细 叙述了基于 S-RS 码字集合以及段内编码和段间编码的数据收集策略即 S-RS 数据收集策略的具体步骤;利用概 率论推导出了 S-RS 数据收集策略的总能耗、数据收集率和时延公式,并依此建立了时延和数据收集率约束下的能 耗最小化这一优化问题.该优化问题可行解空间很小,可以通过穷举法获得最优解.通过求解该优化问题,节点能 够设置最优的数据包编码和重传参数,使得在时延和数据收集率约束下能耗达到最小.数值分析与仿真表明,S-RS 数据收集策略能够以较低的能耗达到较高数据收集率和较低时延要求.此外,可以利用导出的总能耗、数据收集率 和时延,通过优化 S-RS 数据收集策略的参数,最大化数据收集率,最小化时延,也可以同时对总能耗、数据收集率 和时延中的两者或三者进行优化.

关键词 无线传感器网络;数据收集;节能;可靠性;时延;Reed-Solomon 编码;物联网 中图法分类号 TN92 **DOI**号 10.11897/SP.J.1016.2015.02106

# Energy-Efficient and Low-Delay Reliable Data Gathering Scheme Applying Simple Reed-Solomon Code for Wireless Sensor Network

ZHU Yi-Hua XU Ji TIAN Xian-Zhong CHI Kai-Kai

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract Wireless Sensor Network (WSN) usually adopts the low-power and low-rate IEEE 802. 15. 4 standard in its Medium Access Control (MAC) and Physical (PHY) layers. In the WSN, the nodes are powered by battery with very limited energy and wireless links are prone to losing packet. Moreover, in some WSN applications, it is required that the collected data are delivered to the sink node within a given time. Hence, it is extremely significant to develop an energy-efficient, low-delay, and reliable data gathering scheme for WSN applications. In this paper, Reed-Solomon(RS) code is applied to improve the reliability of packet delivery. It aims to form an Optimization Problem (OP) that integrates with energy consumption, Data Gathering Ratio (DGR), data gathering delay, and coding schemes. The set that contains the Simple Reed-Solomon (S-RS) codes is presented, and it is proved that any n members of the set are linearly independent. The data gathering scheme, called the S-RS data gathering scheme, which applies

收稿日期:2014-12-24;最终修改稿收到日期:2015-05-27.本课题得到国家自然科学基金(61432015,61472367,61379124)资助.朱艺华, 男,1961年生,博士,教授,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究领域为物联网、无线网络、网络编码.E-mail: yhzhu@ece.ubc.ca. 徐 骥,男,1990年生,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络.田贤忠,男,1968年生,博士,教授,中国计算机学会(CCF)会员,主 要研究领域为网络编码、移动计算、无线网络协议及优化.池凯凯,男,1980年生,博士,副教授,主要研究方向为无线自组织网络. the S-RS codes, intra-segment coding, and inter-segment coding, is described in detail. In addition, based on probability theory, the Overall Energy Consumption (OEC), the DGR, and the data gathering delay under the S-RS scheme are derived, which are used to build the OP that minimizes the OEC with the constraints of DGR and data gathering delay. The number of the feasible solutions of the OP is small such that it can be easily solved using enumeration method. Through solving the OP, the nodes are able to find the optimal values of the parameters for packet encoding and packet retransmissions such that energy consumption in the S-RS scheme is minimized while the constraints of DGR and data gathering ratio are met. Numeric analysis and simulation results show that the S-RS scheme achieves a higher DGR and a lower delay with lower energy consumption. Moreover, the derived OEC, DGR, and data gathering delay can be used in optimizing the parameters by using the S-RS scheme so as to maximize the DGR, minimize the data gathering delay, or optimize two or three of the OEC, DGR, and data gathering delay.

**Keywords** Wireless Sensor Network; data gathering; energy conservation; reliability; delay; Reed-Solomon code; IoT

# 1 引 言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)已经被广泛地应用于环境监测、医疗保健、交 通运输等领域. IEEE 802.15.4标准<sup>[1]</sup>定义了低功 耗低速率无线网络的介质访问层(Medium Access Control, MAC)和物理层(Physical, PHY).当代 WSN在 MAC 层和 PHY 层均采用上述标准,因而 其无线链路传递数据包具有不可靠和易丢失等特 点.由于低功耗无线链路的无线电覆盖范围小,数据 包需要经过多跳传输才能从一个传感器节点到达 sink节点,这会导致端到端的数据包传递成功率非 常低.因此,需要设计提高数据包传递成功率的切实 可行的方案.

在 WSN 中,节点通常是由能量非常有限的电 池供电.因此,研究如何使节点能够在保证可用性的 情况下尽量降低能量消耗,对 WSN 长时间工作显 得尤为必要.此外,在 WSN 的一些应用尤其是实时 应用中,传感器节点捕获的数据需要在短时间内送 达 sink 节点,因此,降低 WSN 中数据包收集时延也 是非常重要的.

在提高传递数据包可靠性方面,虽然 MAC 层 的重传与确认机制有助于提高可靠性,但是它存在 着以下弱点:(1)在 MAC 层设置了数据帧的最大传 输次数,这会导致发送次数达到最大次数但依然发 送失败的帧被 MAC 层丢弃;(2)已有研究表明<sup>[2]</sup>, 在节点移动的网络中,重传机制开销特别大,而且在 能量受限的 WSN 中这种方法几乎无法实现数据包 可靠传递.鉴于此,本文借助于编码技术来提高数据 包传递可靠性,将来自网络层的数据包进行编码,并 结合数据链路层的重传和确认机制,以能耗、数据收 集率、时延等要求为目标来确定编码方案所采用的 参数值.

诚然,编码方案需要借助一些冗余数据.增大冗 余数据,可以增强数据包传递可靠性,但冗余数据包 的传输会带来额外的能量消耗,也会增加原数据包 的传递时延.反之,如果减少冗余数据,则会削弱数 据包传递可靠性.因此,在设计一个低能耗、低时延 且可靠性高的数据包传输协议时,需要在能耗、时延 和可靠性三者之间作出权衡.

事实上,在基于 IEEE 802.15.4 标准的 WSN 中,节点的处理能力、无线电覆盖范围、可以通信的 数据包长度、内存空间等均为捉襟见肘.例如,IEEE 802.15.4 标准是针对低数据率、低功耗的无线个域 网络,其物理层可以携带的来自数据链路层数据帧 的最大长度只有 127 字节<sup>[1]</sup>;当 MAC 层使用安全 头部时,数据链路层能够携带的来自网络层数据 长度只剩下 81 字节<sup>[3]</sup>.又如,CrossBow 公司生产的 TelosB 传感器节点,只有 10 kB 内存,且兼容 IEEE 802.15.4 标准的射频收发器的通信距离仅为数十 米.遗憾的是,绝大多数已有研究成果未能充分考虑 WSN 节点的上述资源瓶颈,因而难以应用于实践.

我们注意到 Reed-Solomon 编码<sup>[4]</sup>具有以下显 著的优点:(1)接收方一旦收到固定个数的编码包, 就能解码得到原始信息;(2)传输开销小,编码方式

2015 年

简单.这些特点易于在资源极度受限的 WSN 上实现.虽然在编码、数据包传递可靠性、数据收集时延、 能耗等研究领域已有大量成果,但这些成果存在着 缺陷,未能将编码、可靠传递、时延、能耗这四者综合 起来统筹优化.因此,需要一个将四者作为一个整体 来统筹优化的解决方案.此乃本文的主要动机所在.

本文应用 Reed-Solomon 码进行数据包的可靠 传输,主要贡献如下:

(1) 详细描述了利用简单 Reed-Solomon(Simple Reed-Solomon,S-RS)码以及段内编码或段间编码的"S-RS数据收集策略";证明了 S-RS 码中任意 *n* 个码字(Code Word)均为线性独立;推导了 S-RS 数据收集策略在一个数据收集周期内的总能耗、数据收集率和数据收集时延.

(2)设计了数据收集率和数据收集时延约束下 能耗最小化这一优化问题,通过优化 S-RS 码的冗余 度、每个编码包携带的码字个数和 IEEE 802.15.4 标准 MAC 层数据包的重传次数这 3 个参数,可以 达到在事先给定的数据收集率和数据收集时延要求 下,通过最优编码方案,使整个网络数据收集产生的 能耗最小这一目标.

(3) S-RS 数据收集策略所采用的 S-RS 码具有 属性:其前几个码字为原始信息符(Original Information Symbol, OIS),使接收方不用解码就能获得 OIS,当接收方收到的码字不足以解码出全部 OIS 时仍可以得到部分数据.段内编码和段间编码策略 在每个编码包中携带多个 S-RS 码字,以此减少编 码包的发送个数,提高 MAC 帧的利用率,从而降低 能耗.

本文第2节分析相关研究成果;第3节介绍 Reed-Solomon 编码和 S-RS 码;第4节叙述 S-RS 码的段 内编码和段间编码方案以及 S-RS 数据收集策略的 具体步骤;第5节推导使用段间编码的 S-RS 数据 收集策略的能耗、数据收集率和数据收集时延,给出 时延、数据收集率约束下的能耗最小化这一优化问 题;第6节给出在实际的传感器节点中进行实验的 结果;第7节通过仿真分析 S-RS 数据收集策略的 性能;第8节总结本文.

# 2 相关研究

在提高数据包传递可靠性方面,常见的方法有:在 数据链路层采用重传和确认机制<sup>[5]</sup>;在网络层采用多 路径路由<sup>[6-7]</sup>、机会路由<sup>[8]</sup>等.在无线网络中利用编 码技术来实现数据包的可靠传递方案如雨后春笋不断涌现,所用的编码有LT码(Luby Transfer)<sup>[9]</sup>、Tornado码<sup>[10]</sup>、Reed-Solomon码<sup>[2,4]</sup>等.

文献[11]研究了在使用多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output,MIMO)情况下如何最小化 能耗的问题.文献[12]提出了 RMER 和 RMECR 两 种路由,其中 RMER 找到一条端到端的总能耗最小 的路径,而 RMECR 则选择满足可靠性要求下的能 耗最小路径.文献[13]研究了如何在低占空比 WSN 中使用网络编码来降低瓶颈区域的能耗以此延长网 络生存时间这一问题.

按照数据相关性,传感数据的收集方案可以分 类为数据可融合的收集[14-16]和数据不可融合的收 集[17-18]. 在数据可融合的收集应用中,可以把多个节 点所感知的数据采用诸如最大值、平均值等多种方法 进行整合,以此降低网络中节点转发数据包的数量, 进而降低带宽的开销和节点的能耗.例如,MERIG 协议[14] 使用数据融合技术,自适应地传输冗余数据 包,使得在保证可靠性的前提下能耗得以最小化.然 而,在WSN的大量应用中,传感器节点所捕获到的 数据相关性甚微,甚至是不相关的,因此,这类数据 是不可融合的.对于此类应用,节点不能对数据进行 融合,而需要原封不动地把来自其他节点的数据转 发给邻居节点. 在数据不能融合的 WSN 节能问题 研究领域,也取得了一些成果,例如,考虑到流讨离 sink 节点越近的节点的数据量越大,这些节点会越 早因能量耗竭而死亡, MITT<sup>[17]</sup> 根据节点剩余能量 构造一棵最小生成树使得瓶颈节点的子节点数最 小,从而平衡 sink 附近节点的能耗,以最大化网络 生存时间. 文献「19]提出了能耗经济的延长网络生 存时间的算法 ERAPL, 通过构造数据收集序列 (Data Gathering Sequence, DGS)让每个节点按照 比例将数据发送给邻居节点,以此达到节能的目的. 文献[20]提出了一种能量高效的基于线性回归的无 线传感器网络分布式数据采集优化策略,以降低网 络的总能耗. 文献[21]将无线传感器网络的传感数 据以树的形式收集到根. 文献[22]提出了一种负载 均衡感知的无线传感器网络容错分簇算法.

考虑到当代传感器网络节点可以是采用Wi-Fi 使能的传感器(Wi-Fi enabled sensor)<sup>[23]</sup>节点,本文 作者改进了基于定时器的电源管理策略(Timer-based Power Management,TPM)<sup>[24]</sup>,提出了增强的基于 定时器电源管理策略 E-TPM<sup>[25]</sup>,使得传感器节点 能够经济地消耗能量.此外,我们利用网络编码技 术,降低 WSN 的路由能耗<sup>[26]</sup>;利用非前缀信源编码 技术,降低纳米传感器网络发送方的能耗<sup>[27]</sup>.

在利用编码提高传输可靠性方面,可以应用 LT 码<sup>[9]</sup>、Raptor 码<sup>[28]</sup>及其他随机系数的编码. 但 LT 码<sup>[9]</sup>、Raptor 码<sup>[28]</sup>以及采用随机系数的编码存 在着一些不足之处,如接收方一旦接收到一个数据 包,就尝试解码,而目接收方可能因接收到的数据包 的系数矩阵不满秩而无法解码.目前,在应用 Reed-Solomon 编码干无线传感器网络可靠数据传输领 域,也有一些研究成果. 文献 [29] 提出一种应用于 WSN的 Reed-Solomon 码解码器算法以降低能耗: 在有多个 sink 节点的 WSN 应用中: 文献 [30]利用 Reed-Solomon 码将数据包分片编码并在多条路径 上把编码包传递给 sink 节点; 文献[31]提出了 Reed-Solomon 码的硬件实现方法;文献[32]提出了 可靠数据传递方案(Reliable Data Transfer Scheme, RDTS),节点采用 Reed-Solomon 编码逐跳将数据 传递到信宿:文献「33]提出了利用 Reed-Solomon 编码的可靠数据收集方案,给出了数据收集率约束 下的能耗最小化问题.

本文也采用 Reed-Solomon 码提高数据传递的 可靠性,本文策略与之前采用 Reed-Solomon 码的 数据收集策略的明显不同之处在于:将数据包编码 方案、能耗、数据收集率、数据收集时延整合为一个 优化问题,对所涉及的指标进行统筹优化.

# 3 一种简单的 Reed-Solomon 码

Reed-Solomon 码是基于符号的编码<sup>[4]</sup>.用GF(q) =  $\{0,1,\alpha,\alpha^2,\dots,\alpha^{q-2}\}$ 表示伽罗华有限域,其中 q  $\geq 2$  且 是整数,  $\alpha$  是一个素数, 满足  $\alpha^{q-1} = 1$  和  $\alpha^i \neq \alpha^j$  (1  $\leq i < j < q-1$ ).

在有限域 GF(q)中,对于给定的  $n \land (n < q)$ 信 息符(即 OIS): $m_0, m_1, \dots, m_{n-1},$ 构建如下 n-1 阶 多项式<sup>[4]</sup>:

$$f(x) = \sum_{i=0}^{n-1} m_i x^i$$
 (1)

利用式(1),可以得到一个 q 维 Reed-Solomon 码<sup>[4]</sup>:(f(0),f(1),f( $\alpha$ ),f( $\alpha^2$ ),…,f( $\alpha^{q-2}$ )).这个 Reed-Solomon 码的 q 个码字有一个特性:任意 n 个 码字的信息符系数向量是线性无关的.例如,对于前 n 个码字 f(0),f(1),f( $\alpha$ ),f( $\alpha^2$ ),…,f( $\alpha^{n-2}$ ),从 式(1)可知,这些码字对应的信息符  $m_0, m_1, \dots, m_{n-1}$ 的系数向量依次是:(1,0,…,0),(1,1,…,1),  $(1, \alpha, \alpha^2, ..., \alpha^{n-1}), (1, \alpha^2, \alpha^4, ..., \alpha^{2(n-1)}), ...,$  $(1, \alpha^{n-2}, \alpha^{2(n-2)}, ..., \alpha^{(n-1)(n-2)}),$ 而且,这*n*个向量组 成了一个其值不为0的范德蒙行列式,因此,它们是 线性无关的.

Reed-Solomon 码的上述性质说明:接收方一旦 收到 Reed-Solomon 码中任意 n 个码字,就可以通 过解一个满秩的线性方程组得到原来的 n 个信息 符.这是因为在 q 维 Reed-Solomon 码(f(0), f(1),  $f(\alpha), f(\alpha^2), \dots, f(\alpha^{q-2})$ )中所选取的 n 个码字中, 原来的 n 个信息符  $m_0, m_1, \dots, m_{n-1}$ 的系数行列式 是一个 n 阶范得蒙行列式,其值不为 0. 于是,在 WSN 的数据包传递过程中,我们可以选择一个合 适的 q,将原始 n 个信息符  $m_0, m_1, \dots, m_{n-1}$ 编码生 成一个 q 维 Reed-Solomon 码,并将编码之后的数据 包发送给下一个节点.这样,接收方只要收到其中任 意 n 个编码包就可以恢复出原始 n 个信息符.

与文献[33]一样,我们引入向量: $v_i = (1, \alpha^i, \alpha^{2i}, \alpha^{3i}, \dots, \alpha^{(n-1)i}), i = 1, 2, \dots, q-2.$ 此外,引入具有 *n* 个元素的行向量 $e_i$ ,它满足条件:第*i*个元素为1,其 余*n*-1个元素均为0,即 $e_i = (\overbrace{0, \dots, 0}^{i-1}, 1, \overbrace{0, \dots, 0}^{n-i}),$ *i*=1,2,…,*n*.显然, $e_1$ , $e_2$ ,…, $e_n$ 构成一个*n*×*n*单位 矩阵.然后,选取自然数*M*,使它满足*n*<*M*≤*q*-1, 并构建*M*×*n*矩阵如下<sup>[33]</sup>:

 $\boldsymbol{Q}_{M \times n} = (\boldsymbol{e}_1, \boldsymbol{e}_2, \cdots, \boldsymbol{e}_n, \boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2, \cdots, \boldsymbol{v}_{M-n})^{\mathrm{T}}$ 

	[ 1				)
		1			
			1		
				·	
					1
=	1	α	$\alpha^2$	•••	$\alpha^{(n-1)}$
	1	$lpha^2$	$(\alpha^{2})^{2}$	•••	$(\alpha^2)^{(n-1)}$
	1	$\alpha^3$	$(\alpha^{3})^{2}$	•••	$(\alpha^3)^{(n-1)}$
	:	:	•	·.	:
	1	$\alpha^{(M-n)}$	$(\alpha^{(M-n)})^2$	•••	$(\alpha^{(M-n)})^{(n-1)}\Big]_{M\times n}$
					(2)

于是,在本文的数据收集策略中,针对 n 个信息 符  $m_0, m_1, \dots, m_{n-1}$ ,利用矩阵  $Q_{M \times n}$ 进行编码,生成 M 维向量  $C_{M \times 1} = (c_1, c_2, \dots, c_M)^{\mathsf{T}}$ 如下<sup>[33]</sup>:

$$\boldsymbol{C}_{M\times 1} = \boldsymbol{Q}_{M\times n} (m_0, m_2, \cdots, m_{n-1})^{\mathrm{T}}$$
(3)

其中,第*i*个元素为

$$c_{i} = \begin{cases} m_{i-1}, & 1 \leq i \leq n \\ m_{0} + m_{1} \alpha^{(i-n)} + m_{2} (\alpha^{(i-n)})^{2} + \dots + \\ m_{n-1} (\alpha^{(i-n)})^{(n-1)}, & n+1 \leq i \leq M \end{cases}$$
(4)

以下称 M 维向量  $C_{M\times 1}$  为"S-RS 码". 同时,称 向量  $C_{M\times 1}$ 的 M 个元素  $c_i(i=1,2,\dots,M)$ 为码字.

根据下述定理 1,接收方只要收到 S-RS 码的 M 个码字中的任意 n 个,就可以解码得出原来的 n 个信息符  $m_0, m_1, \dots, m_{n-1}$ .

**定理 1.** 在 n+q-2 个向量组成的集合 W = { $e_1, e_2, \dots, e_n, v_1, v_2, \dots, v_{q-2}$ }中,任意 n 个向量均为 线性独立<sup>[33]</sup>.

证明. 将集合W拆分为两个集合 $U = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 和 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{q-2}\}$ .下面分3种情况证明:

(1)取自集合 W 的 n 个向量均来自集合 U. 这时,这些向量线性独立,因为它们组成一个满秩(即 秩为 n)的单位矩阵,其行列式的值不为 0.

(2)取自集合 W 的 n 个向量均来自集合 V. 这时,这些向量也是线性独立,这是因为在 RS 码中原 来 n 个信息符的系数矩阵行列式构成一个范德蒙行 列式,其值不为 0.

(3)取自集合W的n个向量分别来自集合U和 V.如果U中只有一个向量 e<sub>1</sub>被选中,且V中向量 v<sub>1</sub>,v<sub>2</sub>,…,v<sub>n-1</sub>被选中,则这些向量组成一个满秩的 矩阵,其证明过程如下所述.这些向量组成以下行 列式:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & \alpha & \alpha^{2} & \cdots & \alpha^{n-1} \\ 1 & \alpha^{2} & (\alpha^{2})^{2} & \cdots & (\alpha^{2})^{n-1} \\ \vdots & & \ddots & \\ 1 & \alpha^{n-1} & (\alpha^{n-1})^{2} & \cdots & (\alpha^{n-1})^{n-1} \end{vmatrix} = \\ \alpha^{1+2+3+\dots+(n-1)} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \alpha & \alpha^{2} & \alpha^{3} & \cdots & \alpha^{n-1} \\ (\alpha)^{2} & (\alpha^{2})^{2} & (\alpha^{3})^{2} & \cdots & (\alpha^{n-1})^{2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ (\alpha)^{n-2} & (\alpha^{2})^{n-2} & (\alpha^{3})^{n-2} & \cdots & (\alpha^{n-1})^{n-2} \end{vmatrix} = \\ = \alpha^{\frac{n(n-1)}{2}} \prod_{1 \le i < j \le n-1} (\alpha^{i} - \alpha^{j}) \ne 0$$
(5)

因此,所选取出来的n个向量 $e_1, v_1, v_2, \dots, v_{n-1}$ 线性独立.

同理可证:对于 U 中其他一个向量 e<sub>i</sub>被选中 (*i*=2,3,…,*n*)这种情况,所取出的 *n* 个向量是线性 独立的.此外,在 U 中有多个向量被选中的情形,与 推导式(5)的过程类似,可以得到,所选出的 *n* 个向 量构成满秩矩阵.于是定理 1 获得证明. 证毕.

## 4 基于 S-RS 编码的数据收集策略

我们把利用 S-RS 码对源信息符 OIS 进行编码

再把编码包发送给接收方的数据收集策略称为 "S-RS数据收集策略". S-RS数据收集策略应用于 基于树的数据收集场合,树的构建可以采用诸如 CTP<sup>[34-35]</sup>协议、MITT<sup>[17]</sup>等协议.

在 S-RS 数据收集策略中,节点采用 IEEE 802. 15.4 标准的自动重传和确认机制即 ARQ(Automatic Repeat Request)将数据包发送给父节点.树枝节点 用 S-RS 码对数据进行编码,并采用如图 1 所示的 流程发送编码包.图中,内存变量 Num\_trial 存储 当前数据包的发送次数(包括重传次数), Idx\_word 存储 S-RS 码中码字的序号, Num\_rcv 存储接收方 已经收到的码字个数;  $\sigma$  是 IEEE 802.15.4 标准 MAC 帧的最大重传次数;  $\omega_{ack}$ 是 MAC 帧超时定时 器所设置的时间值.



图 1 树枝节点发送数据包流程

树枝节点发送数据包的主要步骤如下:

(1) 将自身产生的数据和所接收到的来自其子 节点的数据采用段间编码或者段内编码(编码方法 见后述)利用式(4)生成 *M* 个 S-RS 码字.

(2) 初始化  $Num\_trial = 0$ ,  $Idx\_word = 1$ ,  $Num\_rcv=0$ .

(3) 在 M 个 S-RS 码字中取出第 Idx\_word 个

码字,将之封装成一个 IEEE 802.15.4 帧,把所组成的帧发送给父节点,并设置帧超时定时器的值为 $\omega_{ack}$ .

(4)如果在 ω<sub>ack</sub>时间间隔内未能收到来自父节 点的 ACK 包(确认包),则重传数据包,直至发送次 数达到 σ+1. 否则(说明父节点已经正确接收到 所发送的数据包),将已经被接收的数据包个数 Num\_rcv 加1,并判断等式"Num\_rcv=n"是否成 立. 若成立,则说明父节点已经收到 n 个码字,足以解 码,因而停止发送码字;否则(说明父节点因未收足 n 个码字而无法解码),取出下一个码字继续发送.

从图 1 可见,在 S-RS 数据收集策略中,树枝节 点的 MAC 层采用 IEEE 802.15.4 的重传和确认机 制.发送方只需收到其父节点的 *n* 个确认包就停止 发送剩余的码字.

从式(4)可以看出:码字  $c_1, c_2, ..., c_n$ 就是源信 息符  $m_0, m_1, ..., m_{n-1}$ .因此,接收方在接收到包含 码字  $c_1, c_2, ..., c_n$ 的数据包时,不需要解码.在接收 到  $n^*$ 个原始信息符号 $(n^* \le n)$ 后,接收方将之代入 到式(4),就可以得到包含其余  $n-n^*$ 个信息符的  $n-n^*$ 元满秩线性方程组,通过高斯消元法解码就 可以得到未知的  $n-n^*$ 个信息符.因此,在理想的链 路状态下(如链路数据包传递率接近 1),本文的 S-RS 数据收集策略只需要传递 n个码字  $c_1, c_2, ..., c_n$ 即原始信息符  $m_0, m_1, ..., m_{n-1}$ ,不需要增加额外的 编码开销.

在 S-RS 数据收集策略中,取

$$\begin{cases} M = \lambda n \\ n \leq (q-1)/\lambda \\ r \geq \log_2(\lambda n + 1) \end{cases}$$
(6)

其中λ为正整数,称为冗余度,且令 q=2<sup>r</sup>.

这样,有限域 GF(q)变为 GF(2<sup>r</sup>),它的每个元 素占 r 比特.我们称有限域 GF(2<sup>r</sup>)的任意一个元素 为一个信息单元(Information Unit,IU).此外,设节 点要发送的传感数据为 X 个,每个传感数据占 $\theta$  个 IU,因而,每个节点需要发送的传感数据量为  $X\theta$ 个 IU.

S-RS 数据收集策略采用两种编码方案:"段内 编码"和"段间编码"<sup>[33]</sup>.这两种方案的共同点在于: 首先对要发送的 X 个传感数据进行分段,使得每段 包含 x 个传感数据,共产生  $s = \lfloor X/x \rfloor$  段,记为  $D_1$ ,  $D_2$ ,…, $D_s$ .显然,每个段有  $f = x\theta$  个 IU,用  $w_{ij}$ 表示 段  $D_i$ 的第 j 个 IU,i = 1, 2, ..., s, j = 1, 2, ..., f. 在 X/x 不是整数时,产生 s+1 段,如图 2 所示.为了减 小发送的比特数,在末段所含传感数据不足 x 时, 我们不采用末尾填补 0 的方式,而是将该段单独使用 ARQ 发送给父节点.



在段内编码方案中,编码操作是逐段进行的,即 在每个段内的 IU 之间进行,它将  $D_i$ 的 f 个信息符  $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{if}$ 作为 S-RS 的编码输入,使用式(4) 编码,生成 M 个 S-RS 码字.具体地说,对于  $D_i$ ,用  $c_{ij}$ 表示由  $D_i$ 编码得到的第 j 个码字,则段内编码方 案生成的 M 个 S-RS 码字如下:

$$c_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & 1 \le j \le f \\ w_{i1} + w_{i2} a^{(j-f)} + w_{i3} (a^{(j-f)})^2 + \dots + \\ w_{if} (a^{(j-f)})^{(f-1)}, & f+1 \le j \le M \end{cases}$$
(7)

其中 *M* 的值由式(6)确定,且取 *n*=*f*,*i*=1,2,...,*s*. 段内编码方案的编码结果如图 3 所示.



图 3 段内编码

当 X 个传感数据的 s 个段都编码完成后,式(7) 产生由 S-RS 码字组成的矩阵 $(c_{i,j})_{s \times M}$ ,编码节点把 这个矩阵的每个列向量封装成一个 IEEE 802.15.4 帧发送出去.例如,第 j 个列向量 $(c_{1,j}, c_{2,j}, \dots, c_{s,j})^{T}$ 封装成的 MAC 帧格式如图 3 的最后一行所示,其 中 MHR 和 FCS 分别为 IEEE 802.15.4 MAC 帧头 部和校验和, enc\_sn 为数据包序号(长度为1字节), j 为编码向量的下标(长度为1字节), f 为段的信息 符个数(长度为1字节).

在段间编码方案中,编码操作是跨段进行的,即 把各段处于相同位置的 IU 进行 S-RS 编码.用  $h_{ij}$ 表示由段  $D_1, D_2, \dots, D_i$ 中第 j 个 IU 编码得到的 S-RS 码的第 i 个码字,那么段间编码方案所生成的 码字满足:

$$h_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & 1 \le i \le s \\ w_{1j} + w_{2j} \alpha^{i-s} + w_{3j} (\alpha^{i-s})^2 + \dots + \\ w_{sj} (\alpha^{(i-s)})^{(s-1)}, & s+1 \le i \le M \end{cases}$$
(8)

其中 *M* 的值由式(6)确定,且取 *n*=*s*,*j*=1,2,...,*f*. 段间编码方案的编码结果如图 4<sup>[33]</sup>所示.



第i个帧	MHR	enc_sn	i	s	$\pmb{h}_{i1}$	$\pmb{h}_{i2}$	 $\pmb{h}_{if}$	FCS
$1 \leq i \leq M$								

图 4 段间编码

当 X 个传感数据的 s 个段都编码完成后,式(8) 产生由 S-RS 码字组成的矩阵 $(h_{i,j})_{M\times f}$ ,编码节点把 这个矩阵的每个行向量封装成一个 IEEE 802.15.4 MAC 帧发送出去.例如,第 i 个行向量 $(h_{i1}, h_{i2}, \cdots, h_{if})^{T}$ 封装成的 MAC 帧格式如图 4 的最后一行所 示.其中,i 为编码向量下标(长度为1字节),s 为段 数(长度为1字节).

上述两种编码方法有各自的特点. 段内编码的 特点是:对于给定的 x,每个帧携带的码字个数为 s, 它随 X 变化而变化,但可发送的编码包的个数 M不变;每个段内前 f 个码字是原始信息符(即 OIS). 由于一个传感数据包含  $\theta$  个 IU,并且每个帧中连续 存放的码字来自不同段的数据,所以不能保证对于某 个收到的段,其前 f 个码字是连续的. 段间编码的特 点是:对于给定的 x,每个帧携带的码字个数是固定 的,这是因为一个帧携带的码字个数为  $f = x\theta$  ( $\theta$  — 般是一固定常数),但可发送的编码包的个数 M = s有关;每个帧中的码字是连续的.

# 5 S-RS 数据收集策略的能耗、时延 及其优化

下面以采用段间编码方式为例,推导本文提出的 S-RS 数据收集策略的总能耗、数据收集率、数据 收集时延(在采用段内编码时,推导过程类似,此处 我们先分析节点将自己缓存的传感数据采用上述 S-RS 数据收集策略发送给其父节点收发双方产生的总能耗,并由此导出整个网络的总能耗、sink 节点的数据收集率、sink 节点收集数据的时延.考虑到目前基于树的数据收集协议如 CTP(Collection Tree Protocol)<sup>[36]</sup> 被广泛应用于无线传感器网络中,本文做如下假设:在所研究的 WSN 中,已经用现成的协议构建了一棵树,节点沿着这棵树将收集到的数据传递到 sink 节点.

此外,我们假设<sup>[33]</sup>:每个节点配置了相同型号的 传感器,每个传感器在每一个数据收集周期内产生的 数据量相同,均为 $L_0 \leq \Gamma$ ,其中, $\Gamma$ 为 IEEE 802.15.4 MAC 帧的有效载荷, $L_0 = \theta r$ , $\Gamma 和 L_0$ 的单位均为比 特.也就是说,每个节点在一个数据收集周期内产生 的数据量可以由一个 MAC 帧携带.

本文用 H 表示每个帧的 MAC 协议层头部(包括 FCS)长度(单位:比特).

#### 5.1 S-RS 数据收集策略的能耗

本文采用文献[37]的能耗模型,即当一个节点 发送 *l* 比特数据给相距为 *d* 的另一节点时,发送方 的能耗为

$$E_{tx}(l,d) = l(\varepsilon_0 + \varepsilon_1 d^{\gamma}) \tag{9}$$

接收方的能耗

$$E_{rx}(l) = l\varepsilon_0 \tag{10}$$

其中, $\gamma$ 为路径衰减指数,在 2~4 之间取值; $\epsilon_1$ 为发 送单位比特无线电放大器的能耗; $\epsilon_0$ 为编码、调制单 位比特的能耗<sup>[37]</sup>.

以 $\Omega$ 表示 WSN 全体节点的集合, *T* 表示数据 收集树,  $\Omega_0$ 表示全体树叶节点的集合. 对于节点  $k \in \Omega$ , 以  $p_k$ 表示它与其父节点间的无线链路传递 数据包成功概率,  $d_k$ 表示它与其父节点的距离,  $L_k$ 表示它发送的数据包长度,  $X_k$  表示它发送的传 感数据个数, 特殊地, 当 k 为 sink 节点时,  $X_k$ 表示 为一个数据收集周期内到达 sink 的传感数据个 数. 此外, 以 CN(k)表示节点 k 的子节点集合,  $\sigma$ 表 示 IEEE 802. 15. 4 MAC 层设定的帧的最大重传 次数.

首先,分析节点 k 使用自动重传机制即 ARQ 将 IEEE 802.15.4 MAC 帧(以下 MAC 帧与数据包 不加区别)发送给父节点的能耗.易知,节点 k 在给 其父节点发送(包括重发)一个数据包时,它的发送 次数及其对应的概率如表 1 所示.

对应的概率 发送次数 成功与否 1 成功 p. 2 成功  $(1-p_h)p_h$ 3 成功  $(1-p_k)^2 p_k$ . . . . ... 成功 σ  $(1-p_k)^{\sigma-1}p_k$ 成功  $\sigma + 1$  $(1-p_k)^{\sigma}p_k$ 成功  $(1-p_k)^{\sigma+1}$ 失败  $\sigma + 1$ 

表 1 节点 k 发送次数及其对应概率

由表 1 可知,在 MAC 层的最大重传次数为σ 时,节点 k 把一个数据包成功传递给父节点的概率为

$$P_{k}^{(S)} = 1 - (1 - p_{k})^{\sigma + 1} \tag{11}$$

根据表1以及式(9)和式(10)可以得到,节点 k 在发送一个长度为 L<sub>k</sub>比特的 IEEE 802.15.4 MAC 帧给它的父节点时,收发双方所产生的平均能耗为<sup>[33]</sup>

$$E_{k}^{\text{ARQ}}(L_{k}) = P_{k}^{(S)} E_{k}^{(S)}(L_{k}) + (1 - P_{k}^{(S)}) E_{k}^{(F)}(L_{k})$$
(12)

式中, $E_k^{(S)}(L_k)$ 表示在传输成功的情况下收发双方 产生的平均能耗:

$$E_{k}^{(S)}(L_{k}) = \left[E_{tx}(L_{k}, d_{k}) + E_{rx}(L_{k})\right] \sum_{i=1}^{\sigma+1} \frac{i(1-p_{k})^{i-1}p_{k}}{P_{k}^{(S)}} + E_{tx}(\beta_{ack}, d_{k}) + E_{rx}(\beta_{ack})$$

$$= L_{k}(2\varepsilon_{0} + \varepsilon_{1}d_{k}^{\gamma}) \cdot \frac{1-(\sigma+2)(1-p_{k})^{\sigma+1} + (\sigma+1)(1-p_{k})^{\sigma+2}}{p_{k}[1-(1-p_{k})^{\sigma+1}]} + 40(2\varepsilon_{0} + \varepsilon_{1}d_{k}^{\gamma})$$
(13)

其中, $\beta_{ack}$ 表示 ACK 包的长度,占 5 字节<sup>[1]</sup>,即 40 比特. 在式(13)中,第 1 行是收发数据时双方产生的能耗,求和符号后面的式子表示在发送成功条件下所需要的平均发送次数;第 2 行是双方收发 ACK 包产生的能耗.此外, $E_k^{(F)}(L_k)$ 表示节点 k 在发送数据包失败的条件下(此时共发送了 $\sigma+1$ 次),所产生的能耗:

$$E_{k}^{(F)}(L_{k}) = (\sigma+1) [E_{tx}(L_{k}, d_{k}) + E_{rx}(L_{k})]$$
$$= (\sigma+1) [L_{x}(2\varepsilon_{\alpha} + \varepsilon_{1}d_{\alpha}^{\gamma})] \qquad (14)$$

其次,分析采用 S-RS 策略时节点 h 发送数据 包收发双方所产生的能耗.根据段间编码方式,节点 h 将  $X_h$ 个传感数据分成 s 段,每段包含 x 个传感数 据即  $f = x\theta$  个 IU.这样,剩余  $X_h^* = X_h \mod x$  个传 感数据,其中,mod 表示整数的求模数运算.由于采 用段间编码,此时 n = f,根据式(6),节点 h 最多可 发送  $M_h = \lambda f$  个编码包,其中前 s 个包中包含的码 字是未经编码的源信息符(以下称之为"明文"),即 第 i 个编码包的数据为原始第 i 个段的数据( $i \leq s$ ). 节点 h 发送的编码包长度为  $L_h = L_{phy} + H + fr + 24$ . 其中, $L_{phy}$ 是物理层头部(包括同步前缀)长度,它依 赖于所采用的物理层;数值 24 是编码序号 enc\_sn (1字节)、编码向量下标 i(1字节)和段数 s(1字节) 所占的比特数(见图 4).

由于节点 h 将 s 段数据编码封装成  $M_h$  个编码 包,每个编码包采用 ARQ 发送,使得其父节点只需 成功接收到 s 个编码包就能够解码出原始 s 段数 据.为了使父节点收到 s 个编码包以成功解码,节点 h 发送的编码包个数及其对应的概率如表 2 所示, 其中, $P_h^{(S)}$ 是由式(11)确定的节点 h 成功发送一个 编码包给其父节点的概率.

表 2 节点 h 发送编码包个数及其对应概率

发送编码 包个数	对应的概率	父节点是否 成功解码
\$	$[P_h^{(S)}]^s$	是
s+1	$C_s^1 (1 - P_h^{(S)}) [P_h^{(S)}]^s$	是
s + 2	$C_{s+1}^2 (1 - P_h^{(S)})^2 [P_h^{(S)}]^s$	是
$M_h - 1$	$C_{M_{h}-2}^{M_{h}-s-1}(1-P_{h}^{(S)})^{M_{h}-s-1}[P_{h}^{(S)}]^{s}$	是
$M_h$	$C_{M_{h}-1}^{M_{h}-s}(1-P_{h}^{(S)})^{M_{h}-s}[P_{h}^{(S)}]^{s}$	是
$M_h$	$(1 - P_h^{(S)})^{M_h}$	否

由于节点 h 所发送的  $M_h$ 个编码包中有 s 个编码包到达其父节点的概率  $G_h$ 等于随机事件"在父节点成功接收到 s 个编码包时,节点 h 恰好发送 i 个数据包( $i=s,s+1,\dots,M_h$ )"的概率之和,由表 2 可得

$$G_{h} = \sum_{i=s}^{M_{h}} C_{i-1}^{s-1} (P_{h}^{(S)})^{s} (1 - P_{h}^{(S)})^{i-s}$$
(15)

且节点 h 发送给父节点的编码包个数均值为

$$a_{h} = \sum_{i=s}^{M_{h}} i C_{i-1}^{i-s} [P_{h}^{(S)}]^{s} [1 - P_{h}^{(S)}]^{i-s} + M_{h} [1 - P_{h}^{(S)}]^{M_{h}}$$
(16)

因此,在节点 h 发送编码包给父节点时收发双方产 生的平均能耗(数学期望)为

$$ET_{h} = \left[G_{h} \sum_{i=s}^{M_{h}} i C_{i-1}^{s-1} \frac{(P_{h}^{(S)})^{s} (1 - P_{h}^{(S)})^{i-s}}{G_{h}} + (1 - G_{h}) M_{h}\right] E_{h}^{ARQ} (L_{h})$$
(17)

其中,方括号内第1项表示在父节点成功接收到 *s* 个段这个条件下节点 *h* 发送的编码包个数(均值), 第2项是在父节点未能成功接收到 *s* 个数据段条件 下节点 *h* 发送的编码包个数(这时 *M<sub>h</sub>*个编码包都被 发送). *E<sub>h</sub>*<sup>ARQ</sup>(*L<sub>h</sub>*)是发送一个编码包的能耗,由式(12) 确定.

在 S-RS 数据收集策略中,当剩余的传感数据  $X_{h}^{*} > 0$  时,节点 h 使用 ARQ 发送这  $X_{h}^{*}$  个传感数 据,收发双方产生的平均能耗 ET<sup>\*</sup> 可以由式(12) 获得[33]:

$$ET_{h}^{*} = (1 - p_{h})^{\sigma+1} (\sigma+1)L_{h} (2\varepsilon_{0} + \varepsilon_{1}d_{h}^{\gamma}) + \left[1 - (1 - p_{h})^{\sigma+1}\right] \left\{ 40(2\varepsilon_{0} + \varepsilon_{1}d_{h}^{\gamma}) + \widetilde{L}_{h} (2\varepsilon_{0} + \varepsilon_{1}d_{h}^{\gamma}) \cdot \frac{\left[1 - (\sigma+2)(1 - p_{h})^{\sigma+1} + (\sigma+1)(1 - p_{h})^{\sigma+2}\right]}{p_{h} \left[1 - (1 - p_{h})^{\sigma+1}\right]} \right\} (18)$$

其中, $\tilde{L}_{i}$ 是 $X_{i}^{*}$ 个传感数据所占的比特数与帧头部 比特数之和,即 $\tilde{L}_h = L_{phv} + (X_h - sx)\theta r + H$ .

对于任意一个节点 z,以 E<sub>z</sub>表示在采用 S-RS 数据收集策略时,收集以节点 z 为根的子树上所有 节点数据所产生的能耗.我们有下述递归式子[33]:

$$E_{z} = \sum_{h \in CN(z)} [E_{h} + \widetilde{E}_{h}], \ z \in \Omega \backslash \Omega_{0}$$
(19)

其中,当 $h \in \Omega_0$ 时, $\tilde{E}_h$ 由式(12)计算,即 $\tilde{E}_h = E_k^{ARQ}(L_k)$ ; 

$$\widetilde{E}_h = ET_h + ET_h^* \tag{20}$$

它表示节点 h 发送 X<sub>h</sub>个传感数据,收发双方产生的 能耗均值.

特别地,当z为 sink 节点时, E<sub>sink</sub>即为一个数据 收集周期内数据收集的总能耗.

最后,举一个例子来说明,如何利用递归式子(19) 计算以节点 z 为根的子树上所有节点传递数据所产 生的能耗  $E_z$ . 假设节点 z 的所有子孙节点 a, b, c,  $a_1, a_2, c_1, c_2, c_3$ 构成的拓扑结构如图 5 所示. 这样, z 的子节点集合  $CN(z) = \{a, b, c\}, 由式(19)$ 得到  $E_z = (E_a + \widetilde{E}_a) + (E_b + \widetilde{E}_b) + (E_c + \widetilde{E}_c), \pm \psi, \widetilde{E}_a \pi$  $\tilde{E}_{c}$ 因 a 和 c 是树枝节点由式(20)计算, 而  $\tilde{E}_{b}$ 因 b 是 叶子节点由式(12)计算.此外,由于 CN(b)是空集, 由式(19)知, $E_b=0$ .由于节点 a 有两个子节点  $a_1$ 和  $a_2$ ,即  $CN(a) = \{a_1, a_2\}$ ,利用式(19)得  $E_a = (E_{a_1} + a_2)$  $\tilde{E}_{a_1}$ )+( $E_{a_2}$ + $\tilde{E}_{a_2}$ ).由于 $a_1$ 和 $a_2$ 均为叶子节点,因 此, $E_{a_1} = E_{a_2} = 0$ ,从而, $E_a = \widetilde{E}_{a_1} + \widetilde{E}_{a_2}$ ,且  $\widetilde{E}_{a_1}$ 和  $\widetilde{E}_{a_2}$ 均由式(12)计算.同理, $E_c = \tilde{E}_{c_1} + \tilde{E}_{c_2} + \tilde{E}_{c_3}$ 且  $\tilde{E}_{c_1}$ 、  $\widetilde{E}_{c_s}$  和  $\widetilde{E}_{c_s}$  由 式 (12) 计 算. 综 上 所 述, 有  $E_z =$  $(\widetilde{E}_{a_1}+\widetilde{E}_{a_2}+\widetilde{E}_a)+\widetilde{E}_b+(\widetilde{E}_{c_1}+\widetilde{E}_{c_2}+\widetilde{E}_{c_2}+\widetilde{E}_c),$   $\ddagger \oplus$ ,  $\tilde{E}_a$ 和 $\tilde{E}_c$ 由式(20)计算,其他项均由式(12)计算.

图 5 节点 z 为树根的子树

#### 5.2 S-RS 策略的数据收集率

我们把 S-RS 数据收集策略的数据收集率 ρ 定 义为:在一个数据收集周期内,到达 sink 节点的数 据包个数与网络中节点总数的比值,即平均每个节 点传递到 sink 节点的数据包个数.

 $以 A_h$ 表示节点h所发送的 $X_h$ 个传感数据中到 达父节点的传感数据平均个数,则数据收集率可以 表示为

$$p = \frac{\sum_{h \in CN(sink)} A_h}{|\Omega|}$$
(21)

式中, |Ω|是网络中节点个数.

下面推导 A<sub>b</sub>的计算公式. 显然,在 S-RS 数据 收集策略中,分段剩余下来的尾部 X<sup>\*</sup> 个传感数据 在采用 ARQ 方式发送时发送成功的数据包平均个 数为  $X_h^*$  [1-(1- $p_k$ )<sup> $\sigma+1$ </sup>]. 对于参与编码的 xs 个传 感数据,在采用 S-RS 数据收集策略时,发送成功的 概率为 $G_{i}$ ,故其发送成功的平均个数为 $xsG_{i}$ ,由于 在参与编码的 xs 个传感数据中,前 s 个帧中包含的 码字是明文(即原来的信息符,不需要解码),因此, 即使接收方未能正确收齐 s 个帧而导致解码失败, 接收方依然可以从收到的帧中获得部分不需要解码 的原信息符.由于节点 h 产生的编码包个数为 $M_b$ =  $\lambda_s$ ,因此,接收方在未能正确收齐 s 个帧导致解码失 败的条件下,能够正确收到明文帧的所有可能情况 为:接收方成功收到 i 个明文帧,其他  $M_{i}$  - i 个帧中 最多被正确接收的帧数为s-i-1个( $i=1,2,\cdots$ , s-1).考虑到在采用段间编码时,成功接收一个明 文帧意味着成功接收到 x 个传感数据.于是,我们 得到节点 h 所发送的  $X_{i}$  个传感数据中到达父节点 的传感数据平均个数<sup>[33]</sup>:

$$A_{h} = x \sum_{i=1}^{s-1} \left\{ i C_{s}^{i} (P_{h}^{(S)})^{i} \cdot (1 - P_{h}^{(S)})^{s-i} \cdot \sum_{j=0}^{s-i-1} C_{(\lambda-1)s}^{j} (P_{h}^{(S)})^{j} (1 - P_{h}^{(S)})^{(\lambda-1)s-j} \right\} + X_{h}^{*} \left[ 1 - (1 - p_{h})^{\sigma+1} \right] + x_{s} G_{h}$$
(22)

值得说明的是,对于任意一个节点z,它需要发 送的传感数据平均个数为

$$X_z = \sum_{h \in CN(z)} A_h + 1 \tag{23}$$

其中,数字1表示节点z自己产生的一个传感数据.

## 5.3 S-RS 策略的数据收集时延

为了支持 WSN 的一些实时应用, IEEE 802.15.4 标准提出了超帧(superframe)结构<sup>[1]</sup>,使节点能够在 超帧的免竞争时期(Contention-Free Period, CFP)



中使用其 GTS(Guaranteed Time Slots)发送数据. 以下基于超帧结构,对 S-RS 的时延进行分析.

本文将节点 A 到节点 B 的数据包时延定义为: 从节点 A 开始发送该数据包到节点 B 的 MAC 层 接收完该数据包这段时间. 自然地, sink 节点收集数 据的时延定义为:网络中任一节点与 sink 节点的端 到端时延的最大者,以  $\tau_{sink}$ 表示.

首先,分析节点 k 使用 ARQ 发送传感数据给父 节点所产生的时延.在 IEEE 802.15.4 标准中,发送 方用参数 macAckWaitDuration<sup>[1]</sup> 设置接收方返回 ACK 包的定时器值,即 $\omega_{ack} = macAckWaitDuration$ . 也就是说,如果发送方在  $\omega_{ack}$  时间耗完后尚未收到 接收方的 ACK 包,那么节点 k 就认为所发送的数 据包丢失从而重传该数据包.在一个帧被正常接收 时,接收方必须等待时间间隔 tack 才能回复 ACK 帧,其中,tack的取值范围为「12,32],其单位为符号 时间(Symbol Period)<sup>[1]</sup>.于是,我们获得结论:节点 k在发送长度为L<sub>k</sub>的数据包时,每失败一次,耗 时 $L_k/R + \omega_{ack}$ ,其概率为 $1 - p_k$ ;每成功一次,耗时  $L_k/R + t_{ack} + \beta_{ack}/R + t_{lifs}$ ,其概率为  $p_k$ .其中,R 是信 道的数据率(单位:bps), $\beta_{ack}$ 是 ACK 包长度(单位: 比特),t<sub>lif</sub>是帧间间隔.因此,节点 k 每次发送数据 包的平均耗时(数学期望)为

$$t_{k}^{\text{pkt}} = (1 - p_{k}) \left( \omega_{\text{ack}} + \frac{L_{k}}{R} \right) + p_{k} \left( \frac{L_{k}}{R} + t_{\text{ack}} + \frac{\beta_{\text{ack}}}{R} + t_{\text{lifs}} \right)$$
(24)

设超帧的时间长度为 $\omega$ ,在超帧中分配给节点 k 的 GTS 时间长度为 $\omega_k$ .若节点 k 在超帧的 GTS 时 间内不能成功发送一个数据包,则该数据包推迟到 下一个超帧的 GTS 时间内发送,而且,MAC 层允 许发送该数据包的最大次数为 $\sigma$ +1.因此,我们需 要计算节点 k 发送一个数据包所需的超帧个数.

由于节点 k 在一个超帧内的 GTS 时间长度为  $\omega_k$ ,故在这段时间内节点 k 可以发送(包括重传)数 据包的平均次数为

$$n_k = \frac{\omega_k}{t_k^{\text{pkt}}} \tag{25}$$

由表 1 可知,节点 k 使用 ARQ 发送传感数据 给父节点的平均发送次数为

 $ETX_{k} = \sum_{i=1}^{\sigma+1} i(1-p_{k})^{i-1} p_{k} + (\sigma+1)(1-p_{k})^{(\sigma+1)} (26)$ 因此节点 k 使用 ARQ 发送一个数据包所需要的 GTS 平均个数为

$$b_k = ceil\left(\frac{ETX_k}{n_k}\right) \tag{27}$$

其中,函数 ceil(x)表示不小于 x 的最大整数.

考虑到节点 k 在发送一个数据包时,若它在所 分配的 GTS 时间内重传多次仍不能成功发送该数 据包,那么,该数据包在下一个超帧的 GTS 时间内 重传.由于在最后一个超帧内节点所分配的 GTS 开 始时间可以在超帧的任意位置,我们取节点的 GTS 的开始时间为 ω/2.因此,节点 k 使用 ARQ 发送一 个数据包的平均时延为

$$T_{k} = (b_{k} - 1)\omega + \omega/2 + t_{k}^{\text{pkt}}$$
$$= \left[ ceil\left(\frac{ETX_{k}}{n_{k}}\right) - \frac{1}{2} \right] \omega + t_{k}^{\text{pkt}} \qquad (28)$$

2115

其次,我们分析节点 z 使用 S-RS 策略收集其 子节点数据的时延.若 z 的子节点为树叶,树叶节点 没有收集数据的时延,只有发送数据包的时延.若 z 的子节点 h 不是树叶,则节点 h 在完成收集其子节 点数据之后,将收集到的传感数据分成 s 段,然后根 据段间编码的方式得到 S-RS 码字,并组装成 M<sub>h</sub> 个 IEEE 802.15.4 MAC 帧,而且 MAC 帧的重传次 数为 σ.

由式(16),节点 h 发送数据包的总次数为  $a_hETX_h$ ,所需要的GTS平均个数为 $ceil(a_hETX_h/n_h)$ ,因此,树枝节点 h 把编码包发送给其父节点 z产生的时延为 $ceil(a_hETX_h/n_h-1)\omega+\omega/2+t_h^{pkt}$ . 此外,在 $X_h$ 不被x 整除的条件下,该分段剩余下来 的 $X_h^*$ 个尾部传感数据采用ARQ方式发送,其时延 由式(28)计算.因而,节点 h 把编码包发送给其父节 点z产生的时延为

 $T_{h} = \omega \left[ ceil \left( \frac{a_{h} ETX_{h}}{n_{h}} \right) + ceil \left( \frac{ETX_{h}}{n_{h}} \right) - 1 \right] + 2t_{h}^{\text{pkt}} (29)$ 其中, ETX<sub>h</sub>, n<sub>h</sub>, a<sub>h</sub>和  $t_{h}^{\text{pkt}}$ 分別由式(26)、(25)、(16)和 式(24)计算.

对于任一节点 z,用 r<sub>z</sub>表示在以节点 z 为根的子 树中,将所有子孙节点的数据收集到节点 z 的时延. 因此,r<sub>z</sub>等于节点 z 所有子节点收集其对应的子孙节 点数据所耗的时间与该子节点发送数据给节点 z 的 时间之和的最大者.换言之,r<sub>z</sub>满足以下递归式:

$$\tau_z = \max_{u \in CN(z)} \{\tau_u + T_u\} \tag{30}$$

其中,当 u 为叶节点时, $\tau_u = 0$ , $T_u$ 由式(28)计算;当 u 为树枝节点时, $T_u$ 由式(29)计算. 值得说明的是, 由式(30)递归计算  $\tau_z$ 的方法与 5.1 节递归计算  $E_z$ 的过程类似,请参见 5.1 节的例子.

这样一来,利用式(30)就可以通过递推得出 sink 节点收集数据的时延 τ<sub>sink</sub>(即从 sink 节点开始收集 数据到所有传感数据到达 sink 节点这个时间段).

### 5.4 数据收集率和时延约束下的能耗最小化

接下来我们研究如何选择 S-RS 的参数使得在

满足事先给定的数据收集率和时延约束下数据收集 的能耗最低这一问题.显然,S-RS数据收集策略的 能耗、数据收集率、时延受到参数λ、*x*和σ的影响. 在 S-RS策略中,采用 S-RS编码虽然可以提高数 据传递的可靠性,但编码、解码以及其他相关运算均 会产生额外的能耗.我们注意到,在传感器节点中, 能耗主要来自于节点之间的通信<sup>[38]</sup>.而且,在WSN 中,给距离10m或100m的节点发送1比特的耗能 是计算操作的几千倍乃至几百万倍<sup>[39]</sup>.因此,本文 仅考虑节点之间的通信能耗即数据收集过程产生的 能耗,而忽略编码、解码及其他计算所产生的能耗. 于是,我们提出如下优化问题:

$$\begin{array}{ll}
\text{Min} & E_{\text{sink}} \\
\text{w.r.t.} & x, \sigma, \lambda \\
\\
\text{s.t.} & \begin{cases} x=1,2,\cdots, \lfloor (992-H)/(\theta r) \rfloor; \\
E_z = \sum_{h \in CN(z)} [E_h + ET_h], z \in \Omega \setminus \Omega_0; \\
E_k = ET_k, k \in \Omega_0; \\
\sigma = 0, 1, \cdots, 7; \\
\lambda = 2, 3, \cdots, 7; \\
\rho > \rho_0; \\
\tau_{\text{sink}} < T_0
\end{array}$$

$$(31)$$

其中, $E_{sink}$ 是关于  $\lambda$ , x 和 $\sigma$  的函数; $\Omega$  表示全体节点 的集合, $\Omega_0$ 表示全体叶节点的集合;重传次数 $\sigma$  的取 值范围为  $0\sim7^{[1]}$ ; $\lambda$  是编码的冗余倍数,由式(6)知  $\lambda\leq(q-1)/n$ ,这里  $\lambda$  的取值范围设置为  $2\sim7$ ;在 IEEE 802.15.4 中 MAC 帧的最大长度为 127 字 节<sup>[1]</sup>,因此  $H+x\theta r+24\leq127\times8$ ,即  $x\leq(992-H)/(\theta r)$ ; $\rho_0$ 表示一个事先给定的传感数据收集率 约束; $T_0$ 表示一个事先给定的时延约束.

在优化问题(31)中,目标函数  $E_{sink}$ 是由式(20) 递推而得的把整个网络节点的数据收集到 sink 节 点所产生的总能耗(参见第 5.1 节); $\lambda, x$  和 $\sigma$  是待 优化的参数.式(31)的第1个约束条件表示,网络中



(b) sink节点

任意一个叶子节点 k 发送编码包给其父节点时收发 双方产生的平均能耗 E<sub>k</sub>,由式(12)计算.式(31)的 第 2 个约束条件表示,任意一个树枝节点 z 从它的 所有子孙节点收集数据所产生的能耗 E<sub>z</sub>,可以采用 递推式(19)计算(参见第 5.1 节).在式(31)的最后 一个约束条件中, τ<sub>sink</sub>由式(30)递推计算而得.

由于优化问题(31)中3个参数的可能取值个数 为: $\lambda$ 为6个, $\sigma$ 为8个,x不足20个(对于表3所列 的参数,x为12个).此外,式(31)约束条件中迭代 计算 $E_z$ 需要求和N次(N为网络中节点个数);对 于判断约束条件 $\tau_{sink} < T$ ,用式(30)递推计算 $\tau_{sink}$ 时,所涉及的求最大值至多需要比较N次.因此,利 用穷举法求解优化问题(31)的复杂度为O(N),在 多项式时间内可以获得优化问题(31)的解.

## 6 S-RS 数据收集策略的实验

我们用 TinyOS 操作系统、NesC 程序设计语言 和 TelosW 节点<sup>[40]</sup>进行实验,以此说明本文提出的 S-RS 数据收集策略可以在资源受限的传感器节点 上实现. TelosW 节点属于 Telos 系列,具有内置的 能量表(Energy Meter)<sup>[41]</sup>供程序读取.根据能量表 的数值可以计算出节点的能耗<sup>[42]</sup>,不需要采用外接 本身就耗能的设备来检测能耗.

将 6 个 TelosW 节点联成如图 6(a)所示的拓扑 结构,其中,节点 0 为 sink 节点. sink 节点连接到台 式机直接由台式机供电,其实物如图 6(b)所示;其 余 5 个节点的布置如图 6(c)所示.每个 TelosW 节 点每一轮产生 10 个传感数据,每个传感数据长度为 10 字节(即 $\theta$ =10).每个段所包含的传感数据个数 x=4.图 7 是在不同重传次数下收集 1000 轮数据的 平均值.从图 7 可以看出:(1)S-RS 的能耗("Energy Meter")远低于 ARQ 方案(见图 7(a)).需要说明的 是,Energy Meter 的数值可以转化为能量,它与能



(c) 其余5个节点

图 6 用 TelosW 节点的实验场景



图 7 用 TelosW 节点的实验结果

量值存在着正比例关系:它的数值越大,对应的能量 值也越大<sup>[42]</sup>;(2)在重传次数(即 $\sigma$ )的值比较大时 (如 $\sigma$ ≥2)时,两者的数据收集率一致;但当 $\sigma$ <2时, S-RS的数据收集率优于 ARQ 方案(见图 7(b)); (3)S-RS 的数据收集时延远低于 ARQ(见图 7(c)).

## 7 性能分析

上一节我们已经在 TelosW 节点上对本文提出 的 S-RS 方案进行了实验.事实上,真实环境的实验 存在着困难之处,即难以对一些参数的变化进行模 拟.例如,我们难以布置一对节点使它们之间链路的 数据包传递成功率为一个事先给定的数值.因此,需 要求助于仿真.本节,我们用 C++程序设计语言编 制仿真程序对 S-RS 数据收集策略的性能进行分 析.在仿真中,在 1000×1000 m<sup>2</sup> 区域里随机部署 400 个节点,sink 节点放在区域中间,节点的通信范 围为 100 m.数据收集树以 sink 为根节点随机生成. 本节所给出的结果是随机生成 500 棵树,每棵树上 采用 S-RS 数据收集策略 200 次的平均值.

与文献[37]一样,取  $\varepsilon_1 = 10 \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2), \varepsilon_0 = 50 \text{ nJ/bit}, 且取 \gamma = 2(对应于自由空间模型). 在 S-RS 编码中,选择信息单元 IU 的长度为 8 比特. 每个传 感数据包含 IU 的个数 <math>\theta = 8$ . 在 IEEE 802. 15. 4 中, MAC 帧头部长度 H = 200 比特(即 25 字节),这样, 在式(31)中 x 的最大值为 12. 另外,假设物理层使用 O-QPSK(Offset-Quadrature Phase Shift Keying) 调制方案,其数据率 R = 250 Kbps,此时一个符号时 间为  $16 \mu \text{s}, t_{\text{lifs}} \pi t_{\text{ack}}$ 分别为 0. 64 ms 和 0. 192 ms,接 收 ACK 包的定时器时间值  $\omega_{\text{ack}}$ 为 0. 704 ms<sup>[1]</sup>.

在 IEEE 802.15.4 中,一个超帧结构由参数 amacSuperframeOrder和amacBeaconOrder描述<sup>[1]</sup>, 当这两个参数取值相同时,超帧为活跃时间,一个超 帧由 16 个时隙构成,每个时隙的长度为 aBaseSlotDuration×2<sup>amacSuperframeOrder</sup>,其中aBaseSlotDuration= 960 µs.为了保证 S-RS 策略在一个时隙中可以发 送一个帧,我们取 amacSuperframeOrder=3.在仿 真中,超帧中不设自由竞争周期(Contention Access Period, CAP)<sup>[1]</sup>,即16个时隙全部用于分配 GTS.为 清楚起见,仿真采用的主要参数值列在表 3 中.

表 3 仿真参数

参数名	值
区域	$1000 \times 1000  { m m}^2$
节点数	400
通信范围	100 m
$\boldsymbol{\epsilon}_1$	$10  \mathrm{pJ/(bit \cdot m^2)}$
$\boldsymbol{\epsilon}_0$	50 nJ/bit
γ	2
r	8
$\theta$	8
Н	200 bit
R	$250\mathrm{Kpbs}$
$eta_{ m ack}$	40 bit
$t_{ m lifs}$	0.64 ms
$t_{ m ack}$	0.192ms
$\omega_{ m ack}$	0.704 ms
amacSuperframeOrder	3
amacBeaconOrder	3
一个 Slot 时间	7.68ms

在进行性能分析之前,我们通过仿真来验证第 5节推导的分别以式(19)、(21)和式(30)表示的总 能耗  $E_{sink}$ 、数据收集率 $\rho$ 和数据收集时延 $\tau_{sink}$ 的正确 性.图 8 是当  $x=10,\lambda=5,\sigma=5$ 时在不同链路质量 下仿真和计算结果及其误差图.图中,"S-RS-Sim" 和 "S-RS-Cal"分别表示仿真和数值计算结果.在 计算结果中,总能耗  $E_{sink}$ 、数据收集率 $\rho$ 和数据收集 时延 $\tau_{sink}$ 分别由式(19)、(21)和式(30)计算而得.在 图 8 中,第 2 行分别是计算结果  $v_e$ 与仿真结果  $v_s$ 的 相对误差,定义为 $|v_e - v_s|/v_s$ .从图 8 可见,仿真结 果与计算结果比较吻合且趋势一致,因此,在分析 S-RS数据收集策略的性能时,我们直接利用式(19)、(21)和式(30)进行分析.

首先,分析参数 x(每个编码包携带的传感数据 $个数)和 <math>\lambda(编码冗余度)$ 的变化对 S-RS 策略性能的 影响.固定链路传递数据包成功率  $p_k=0.6$ ,让 x变 化,得到图 9;固定  $x=10,\sigma=3$ ,让  $p_k$ 变化,得到 图 10.从图 9(a)和图 9(c)可见,随着 x 增大,能耗 和时延逐渐降低,这是因为发送的编码包个数减小. 从图 9(b)可见,随着 x 增大,数据收集率逐渐降低, 这是因为,在x增大之后每个编码包中包含的传感数据个数也增大,这导致在出现丢包时丢失的传感数据也增大,进而导致数据收集率下降.从图 10 可见,对于一个给定的 $p_k$ ,编码冗余度 $\lambda$ 增大到一定值之后,继续增大 $\lambda$ 不能带来数据收集率的增大(见图 10(b)),而且也不增大能耗和时延(见图 10(a)和图 10(c)),这是因为在 S-RS 策略中,节点在收到足够解码的数据包个数之后,给发送方发送 ACK,使得发送方停止继续发送编码包.



图 10 参数 λ 对 S-RS 策略性能的影响

其次,利用仿真比较 S-RS 数据收集策略和 IEEE 802.15.4 的 ARQ 策略.图 11 是在取 λ=7 和 x=10时不同最大重传次数(即 σ)下两种策略的比较 结果.从图 11 可以看出:(1)对于一个给定的最大 重传次数, S-RS 数据收集策略的总能耗 E<sub>sink</sub> 和数 据收集率 ρ 均优于 ARQ(见图 11(a)和(b));(2) 在 链路传递数据包成功概率 pk大于 0.2 时,S-RS 数 据收集策略的时延 τ<sub>sink</sub>优于 ARQ(见图 11(c)). 此 外,从图 11 可以进一步发现两个策略的共同特点: (1)数据收集率 ρ 随着链路质量的提高(即链路传递 数据包成功概率  $p_i$ 的增大)而提高,这和直观是吻 合的;(2)两种策略的总能耗 E<sub>sink</sub>和数据收集时延  $\tau_{sink}$ 随着链路质量提高,呈现先上升后下降之趋势, 其理由如后所述.当链路质量比较差时,p,略微增大 会导致节点的数据包经过更多的中间节点,但最终 因链路质量差未能到达 sink 节点. 也就是说,在这 种情形下, p<sub>k</sub>的增大会引起网络中更多的中途夭折 的数据包被发送, 使得整个网络的能耗和收集数据 的时延增大. 然而, 当链路质量比较好时, p<sub>k</sub>的增加 使得更多的数据包被传递到 sink 节点, 而且在每条 链路, 数据包的重传次数降低了, 从而降低了整个网 络的能耗和收集数据的时延.

再次,利用仿真对 S-RS 数据收集策略和同 样应用 Reed-Solomon 码 的 可 靠 数 据 传 输 策 略 RDTS<sup>[32]</sup>进行比较.在 RDTS策略中, $\delta$ 是一个关键 参数,但文献[32]未给出具体的计算方法.因此,我 们分别取  $\delta = M/5, 2M/5, 3M/5, 4M/5$ 和 M,并把对 应的 RDTS策略分别记为 RDTS-1/5, RDTS-2/5, RDTS-3/5, RDTS-4/5 和 RDTS-1.在 S-RS策略 中,取  $\lambda = 5, x = 10.1000$ 次仿真运算结果如图 12 所 示. 由图 12 左上方子图可见,在 RDTS策略中, $\delta$ 越 大 (冗余数据越多),则数据收集率越高,在这些 $\delta$ 



图 12 S-RS 策略和 RDTS 策略性能比较

取不同值的 RDTS 策略中,以 RDTS-1 的数据收集 率最高.因此,我们选取数据收集率最高的 RDTS-1 策略与本文 S-RS 策略进行比较,比较结果显示在 图 12 的其余 3 个子图中.从图 12 右上方子图可见, 在 S-RS 策略中,在 MAC 帧重传次数 $\sigma \ge 2$  时,S-RS 策略的数据收集率优于 RDTS 策略.而且,从图 12 左下方子图可见,在 $\sigma = 3$  时,S-RS 策略的能耗也优 于 RDTS 策略.从图 12 可以进一步看出,在链路成 功概率  $p_k \ge 0.35$  时,只须选取 $\sigma = 3$ ,S-RS 策略的 数据收集率、能耗、时延均优于 RDTS 策略.

最后,考虑求解式(31)的优化问题. 固定  $p_k =$ 0.6,让事先给定的数据收集率取不同的值: $\rho_0 =$ 0.88,0.90,…,0.98 时,且取时延约束  $T_0 = 2900$ , 3000,3100 ms 时,通过求解式(31)的优化问题,我 们得到图 13.图中,左上方是能耗  $E_{sink}$ 的最优值,右 上方、左下方、右下方分别是优化问题最优解对应的 参数  $x,\sigma,\lambda$ 值.从图 13 可以看出:(1)在  $T_0$ 给定时, 能耗  $E_{sink}$ 最优值随着  $\rho_0$ 的增大而增大,这是因为  $\rho_0$ 



的增大意味着可靠性的提高,从而需要一个比较大 的重传次数,例如,在 $T_0 = 3000 \text{ ms}$ 时,随着 $\rho_0$ 从 0.88 逐渐增大到 0.92,重传次数 σ 从 1 逐渐增大到 3,这导致能耗增加;(2)式(31)的优化问题并非总 是存在最优解.例如,在时延约束  $T_0 = 3000 \,\mathrm{ms}$  时, 当数据收集率约束 0.5 升 0.94 时,上述优化问题无 解.也就是说,在实践中很难做到既要达到高数据收 集率,又要数据时延足够小.其理由是,如果我们需 要 S-RS 策略达到比较高的数据收集率,那么节点 需要发送比较多的冗余编码包,这会导致能耗和时 延的增加.同样,为了降低能耗和时延,节点需要减 少重传次数和编码包个数,这会导致一些数据包无 法到达 sink 节点,从而降低数据收集率;(3) 在优化 问题(31)存在最优解的条件下,通过求解优化问题 (31)获得参数  $x,\lambda,\sigma$  的最优值,从而使 S-RS 策略 的能耗达到最低. 例如, 在收集率约束  $\rho_0 = 0.94$  和 时延约束  $T_0 = 3000 \text{ ms}$  时, sink 节点可以选择 x =12, $\sigma=3$ 和  $\lambda=2$  使得  $E_{sink} \approx 6.4 \times 10^4$  uJ.





考虑到 MITT<sup>[17]</sup>策略构造一棵最小生成树使 得瓶颈节点的子节点数最小,从而平衡 sink 附近节 点的能耗,以最大化网络生存时间,我们通过仿真将 本文提出的 S-RS 策略在其参数 *x*、λ<sub>σ</sub> 设置为优化 问题(31)的最优解的条件下,与 MITT 策略的生存 时间进行对比.此处,生存时间定义为网络自投入运 行至出现第一个剩余能量为零的节点这一时间段 (以 sink 收集传感数据的轮数度量). 仿真中,在随 机构建了一颗数据收集树之后,随机分配给每个节 点 1.5~2 焦耳的初始能量. MITT 策略的 MAC 层 重传次数取 3(这是 IEEE 802.15.4 标准的默认 值). 在网络节点数从 100~400,  $T_0$  = 3100 ms 时,分 别取  $\rho_0$  = 0.90 和  $\rho_0$  = 0.95,解优化问题(31),将最 优参数的 S-RS 策略和 MITT 的结果进行比较,如 图 14 所示. 从图 14(a)可以看出:(1)本文提出的 S-RS 策略在数据收集率高于 MITT 策略的前提下 (见图 14(b)),网络生存时间也大大高于 MITT 策 略(见图 14(a));(2) S-RS 策略和 MITT 策略的网 络生存时间都随着网络规模的增大而减小(见图 14 (a)),这是因为当网络中节点增多时,sink 每轮需要 收集的数据就越多,从而能耗也越大,这会缩短网络 生存时间;(3)S-RS策略和 MITT策略的数据收集 率都随着网络规模的增大而减小(见图 14(b)),这 是由于随着网络中节点的增加,数据包需要经过更 多节点的中继才能被传递到 sink 节点,这会降低数 据包端到端的可靠性.



图 14 MITT 和 S-RS 比较

顺便指出,把式(31)的优化目标函数换成数据 收集时延 τ<sub>sink</sub>,我们可以对时延最小化;或者把 式(31)的优化目标换成数据收集率ρ从而进行最大 化.也可以将能耗 E<sub>sink</sub>、数据收集率ρ和数据收集时 延τ<sub>sink</sub>中的两者或者三者同时作为优化目标,构建 多目标优化问题,从而使能耗、数据收集率和数据收 集时延均达到最优.有兴趣的读者可以自行对之进 行研究.

# 8 结束语

本文应用简单的 Reed-Solomon 码于可靠数据 传递,提出了 S-RS 数据收集策略.这个策略可以让 节点采用段内编码或者段间编码将要传递的传感数 据进行分段和编码,通过优化每个段所包含的传感 数据个数、编码冗余度、数据链路层重传次数这3个 参数,使得在事先给定的数据收集率和时延约束条 件下收集数据的能耗达到最低.S-RS 数据收集策 略适用于链路易丢包的低功耗的数据不可融合的无 线传感器网络.

## 参考文献

 IEEE Computer Society. IEEE 802. 15. 4 Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2011

- [2] Mutschlechner M, Li B, Kapitza R, Dressler F. Using erasure codes to overcome reliability issues in energy-constrained sensor networks//Proceedings of the 11th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS). Obergurgl, Austria, 2014: 41-48
- [3] Montenegro G, Kushalnagar N, Hui J, Culler D. Transmission of IPv6 packets over IEEE 802. 15. 4 Networks. RFC4944, 2007
- [4] Wicker S B, Bhargava V K. Reed-Solomon Codes and Their Applications: An Introduction to Reed-Solomon Codes. New York: Wiley-IEEE Press, 1999
- [5] Lin S, Costello D, Miller M. Automatic-repeat-request error-control schemes. IEEE Communications Magazine, 1984, 22(12): 5-17
- [6] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. ReInForM: Reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks// Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. Bonn, Germany, 2003: 406-415
- [7] Chakraborty Suchetana, Chakraborty Sandip, Nandi S, Karmakar S. RelBAS: Reliable data gathering from border area sensors//Proceedings of the 2013 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Split, Croatia, 2013: 904-909
- [8] Xu Ming-Sen, Song Wen-Zhan, Zhao Yi-Chuan. Collaborative data collection with opportunistic network erasure coding. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(10): 1941-1950
- $\cite{2.1}$  Luby M G. LT codes//Proceedings of the 43rd Annual IEEE

Symposium on Foundations of Computer Science. Vancouver, Canada, 2002: 271-280

- [10] Luby M G, Mitzenmacher M, Shokrollahi M A, Spielman D
   A. Efficient erasure correcting codes. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 569-584
- [11] Li B, Wang W, Li H, Yin Q, et al. Performance analysis and optimization for energy-efficient cooperative transmission in random wireless sensor network. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(9), 1635-1639
- [12] Vazifehdan J, Prasad R V, Niemegeers I. Energy-efficient reliable routing considering residual energy in wireless ad hoc networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 13(2): 434-447
- [13] Rout R R, Ghosh S K. Enhancement of lifetime using duty cycle and network coding in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 656-667
- Luo Hong, Tao Hui-Xiang, Ma Hua-Dong, Das S K. Data fusion with desired reliability in wireless sensor networks.
   IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(3): 501-513
- [15] Kui Xiao-Yan, Wang Jiang-Xin, Zhang Shi-Geng. A data gathering algorithm based on energy-balanced connected dominating sets in wireless sensor networks//Proceedings of the 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai, China, 2013; 1139-1144
- [16] Baksi S, Sinha A, Khatua S, Das R K. Finding the maximum lifetime data-gathering tree in sensor networks//Proceedings of the 2014 IEEE 9th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP). Singapore, 2014; 1-6
- [17] Liang Jun-Bin, Wang Jiang-Xin, Cao Jian-Nong, et al. An efficient algorithm for constructing maximum lifetime tree for data gathering without aggregation in wireless sensor networks//Proceedings of the 2010 IEEE INFOCOM. San Diego, USA, 2010: 1-5
- [18] Imon S K A, Khan A, Francesco M D, Das S K. RaSMaLai: A randomized switching algorithm for maximizing Lifetime in tree-based wireless sensor networks//Proceedings of the 2013 IEEE INFOCOM. Turin, Italy, 2013; 2913-2921
- [19] Zhu Yi-Hua, Wu Wan-Deng, Jian Pan, Tang Yi-Ping. An energy-efficient data gathering algorithm to prolong lifetime of wireless sensor networks. Computer Communications, 2010, 33(5): 639-647
- [20] Song Xin, Wang Cui-Rong. Linear regression based distributed data gathering optimization strategy for wireless sensor networks. Chinese Journal of Computers, 2012, 25(3): 568-580(in Chinese)

(宋欣,王翠荣.基于线性回归的无线传感器网络分布式数据采集优化策略,计算机学报,2012,25(3):568-580)

- [21] Liu Yun-Lu, Pu Ju-Hua, Fang Wei-Wei, Xiong Zhang. A MAC layer optimization algorithm in wireless sensor networks. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(3): 529-539(in Chinese)
  (刘云璐, 蒲菊华, 方维维, 熊璋. 一种无线传感器网络 MAC 协议优化算法, 计算机学报, 2012, 35(3): 529-539)
- [22] Su Jin-Shu, Guo Wen-Zhong, Yu Chao-Long, Chen Guo-Long. Fault-tolerance clustering algorithm with load-balance aware in wireless sensor network. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(2): 445-456(in Chinese)
  (苏金树,郭文忠,余朝龙,陈国龙.负载均衡感知的无线传 感器网络容错分簇算法.计算机学报,2014,37(2): 445-456)
- [23] Tozlu S. Feasibility of Wi-Fi enabled sensors for Internet of Things//Proceedings of the 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Wuhan, China, 2011: 291-296
- [24] Zhu Yi-Hua, Leung V C M. Efficient power management for infrastructure IEEE 802. 11 WLANs. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(7): 2196-2205
- [25] Zhu Yi-Hua, Luan Shenji, Leung V C M, Chi Kaikai. Enhancing timer-based power management to support delayintolerant uplink traffic in infrastructure IEEE 802.11 WLANS. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(1): 386-399
- [26] Lu Wen-Wei, Zhu Yi-Hua, Chen Gui-Hai. Energy-efficient routing algorithms based on linear network coding in wireless sensor networks. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2309-2314(in Chinese)
  (卢文伟,朱艺华,陈贵海. 无线传感器网络中基于线性网络编码的节能路由算法,电子学报,2010,38(10): 2309-2314)
- [27] Chi Kai-Kai, Zhu Yi-Hua, Jian Xiao-Hong, Leung V C M. Energy-efficient prefix-free codes for wireless nano-sensor networks using OOK modulation. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2670-2682
- [28] Shokrollahi A. Raptor codes. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2551-2567
- Qassim Y, Magana M E. Error-tolerant non-binary error correction code for low power wireless sensor networks// Proceedings of the 2014 International Conference on Information Networking (ICOIN). Phuket, Thailand, 2014: 23-27
- [30] Ali S, Fakoorian A, Taheri H. Optimum Reed-Solomon erasure coding in fault tolerant sensor networks//Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2007). Trondheim, Norway, 2007: 6-10
- [31] Tan Poh-Ling, Cheah Cheng-Lai, Ho Chee-Kit. Hardware implementation of Reed-Solomon error correction technique for wireless sensor network based on error pattern analysis// Proceedings of the 2014 IEEE Region 10 Symposium. Kuala Lumpur, Malaysia, 2014: 347-350

- [32] Srouji M S, Wang Z, Henkel J. RDTS: A reliable erasurecoding based data transfer scheme for wireless sensor networks //Proceedings of the 2011 IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). Tainan, China, 2011; 481-488
- [33] Zhu Yi-Hua, Xu Ji, Li Er-Tao, Xu Lin. Energy-efficient reliable data gathering scheme based on enhanced Reed-Solomon code for wireless sensor networks//Proceedings of the SMARTCOMP 2014. Hong Kong, China, 2014: 275-280
- [34] Gnawali O, Fonseca R, Jamieson K, et al. Collection tree protocol//Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA, 2009: 1-14
- [35] Jambli M N, Azlina A J, Farha Anati A M, et al. Performance evaluation of CTP routing protocol for mobile Wireless Sensor Network//Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Wireless Sensor. Kuching, Malaysia, 2013; 97-101
- [36] Gnawali O, Fonseca R, Jamieson K, et al. CTP: An efficient, robust, and reliable collection tree protocol for wireless sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks, 2013, 10(3): 10-17
- [37] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H.



**ZHU Yi-Hua**, born in 1961, Ph.D., professor. His main research interests include the Internet of Things (IoT), wireless networks, and network coding. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670

- [38] Murugantha S D, Ma D C F, Fapojuwo A Q. A centralized energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks.
   IEEE Communications Magazine, 2005, 43(3): s8-13
- [39] Al-Karaki J N, Kamal A E. Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(6): 6-28
- [40] Lu G, De D, Xu M, et al. TelosW: Enabling ultra-low power wake-on sensor network//Proceedings of the 2010 7th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS). Kassel, Germany, 2010: 211-218
- [41] Dutta P, Feldmeier M, Paradiso J, Culler D. Energy metering for free: Augmenting switching regulators for real-time monitoring//Proceedings of the 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'08). St. Louis, USA, 2008: 283-294
- [42] Jin L, Zhu Y-H, Leung V C M, Song W-Z. An adaptive energy-conservation scheme with implementation based on TelosW platform for wireless sensor networks//Proceedings of the 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC2011). Cancun, Mexico, 2011, 926-931

**XU Ji**, born in 1990, M. S. candidate. His research interests focus on wireless sensor networks.

**TIAN Xian-Zhong**, born in 1968, Ph. D., professor. His current research interests include network coding, mobile computing, and the optimization of protocol for wireless networks.

**CHI Kai-Kai**, born in 1980, Ph. D., associate professor. His main research interest is wireless Ad Hoc networks.

#### Background

Wireless Sensor Network (WSN) is used in gathering data from the environment. In the WSN, nodes are usually powered by battery with very limited energy. It is very important to design an energy-efficient data gathering scheme to prolong the WSN's runtime. Contemporary WSN usually adopts the low-power and low-rate IEEE 802. 15. 4 standard in its Medium Access Control (MAC) and Physical (PHY) layers. Therefore, wireless links connecting the sensor nodes in the WSN are prone to losing packet. This reduces Packet Delivery Reliability (PDR), which can be measured by Data Gathering Ratio (DGR) defined as the ratio of the total number of the packets received by the sink node to that of transmitted by the sensor nodes. Moreover, the sensor nodes have short radio ranges, causing a packet to be forwarded by multiple sensor nodes over lossy wireless links before it reaches the sink node, which further reduces PDR.

To improve PDR, the traditional scheme applies retransmission/acknowledgement (ACK) scheme in the MAC layer. But this may cause extra energy consumption in addition to packet delay. Up to date, researchers around the world have been seeking an efficient and effective way of improving PDR based on coding scheme in which redundant data are added, but transmitting the redundant data packets also causes extra energy consumption. In the literature, there are many works that focus on reducing energy consumption and/or improving PDR of WSN. However, there is still a void in integrating

2123

coding scheme with energy consumption, PDR, and data gathering delay such that the optimal coding scheme is found to minimize the energy consumption under the constraints of given PDR and data gathering delay. This paper fills this void.

In this paper, the data gathering scheme called "S-RS scheme" is proposed, which uses a Simple Reed-Solomon (S-RS) coding. The Overall Energy Consumption (OEC), DGR, data gathering delay of the proposed S-RS scheme are derived, which are used to build the Optimization Problem (OP) that minimizes the OEC with the constraints of the preset data gathering delay and DGR. Through solving the OP, the nodes are able to find the optimal values of the parameters, which is then used in the S-RS scheme to achieve the minimal energy consumption under the given

constrains.

This research is supported by National Natural Science Foundation of China under Grant Nos. 61432015, 61472367, and 61379124, which investigate some key problems arising in wireless networks, including reliable disseminating information, saving energy, improving throughput etc. in wireless networks. The proposed S-RS scheme is applicable to reliably and energy-efficiently delivering packets over lossy wireless links. We have proposed several schemes to save energy, such as the Timer-based Power Management (TPM), the prefix-free coding scheme, and others, which were published in the journals including IEEE Transactions on Wireless Communications, IEEE Transactions on Network and Service Management, IEEE Transactions on Vehicular Technology, and more.