

基于 RS 纠删码的无线传感器网络信息分发协议性能评价

杜军朝 刘 惠 李晓军 张茨俊 张云扬

(西安电子科技大学软件工程研究所和 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

摘 要 无线传感器网络中,传感器节点的能量、存储和计算能力有限,且无线传感器网络具有数据链路不对称、拓扑易变化等特点,设计节能可靠的网络协议是困难的。设计良好的网络协议不仅能降低网络的负载,还有助于节省传感器节点的能量,从而延长网络的生存周期。在无线传感器网络操作系统 TinyOS 平台上实现了基于 RS 纠删码的信息分发协议,并理论分析了在单跳情况下的协议性能,最后在仿真环境 TOSSIM 上模拟比较了在多跳、多路径情况下该信息分发协议和洪泛分发协议的性能。模拟仿真表明,提出的基于 RS 纠删码的信息分发协议明显减少了发送方发送数据包的数量,同时提高了节点的报文接收率,从而达到了降低网络能耗的目的。

关键词 无线传感器网络,信息分发协议,RS 纠删码

中图分类号 TP393.2 **文献标识码** A

Performance Evaluation of Information Dissemination Protocol in WSNs Based on RS Erasure Codes

DU Jun-zhao LIU Hui LI Xiao-jun ZHANG Ying-jun ZHANG Yun-yang

(Software Engineering Institute and ISN National Key Lab, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract In wireless sensor networks (WSNs), the energy supply, storage capacity and computation power of sensor node are constrained. Furthermore, the irregular link and variable topology are common. Hence, it is difficult to design and implement a reliable and energy efficient network protocol. Well-designed network protocol can not only reduce network load, but also help to save energy of sensor nodes, therefore prolonging the network life. In this paper, an information dissemination protocol based on RS erasure codes was proposed and implemented in TinyOS platform, which is a widely used operating system in WSNs. We analyzed the performance of the protocol in theory for single hop case, and we also made a performance comparison with flood information dissemination protocol in the TOSSIM. The simulation results show that the proposed information dissemination protocol based on RS erasure codes obviously reduces the number of packets to transmit, improves the packet delivery ratio, and saves network energy consumption.

Keywords Wireless sensor networks, Information dissemination protocol, RS erasure codes

1 概述

无线传感器网络是传感技术向集成化、微型化、网络化和智能化方向发展的结果。它改变人与自然交互的方式,是因特网从虚拟世界到物理世界的延伸,从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通^[1-3]。目前,无线传感器网络在煤矿中瓦斯浓度检查和塌方监测中应用^[4],也有研究者将其应用于森林防火以森林覆盖率的研究中^[5]。

由于无线传感器网络的通讯能力和存储能力有限,并且无线链路使用的是开放的有损传播介质,加上信道使用的是开放的 ISM 频段,这就使得无线传感器网络的丢包率较为严重,一般会达到 10% 或者更高,有研究者通过链路质量预测和链路层服务来缓解这个问题^[6]。

为了完成网络数据的可靠传输,一种简单的方式就是简单多次发送,这种方法不能保证数据可靠传输,并且会大大增加发包的数量。还有一种方法是采用请求重发的方式,即接收端对于未接收的数据包向发送端发送重发请求,发送端接收到该请求后将丢失的数据包再次发送。如果数据包再次丢

失,则接收端再次发送重发请求。该方法对于单播很有效,但是传感器网络多数使用多播或广播的方式,如果丢包率稍大,大量的重发请求很可能会给发送端带来灾难性的后果。为此,我们可以采用前向纠错的方式,通过编码技术在降低信息的传输率的情况下提高数据传输的抗干扰能力。在无线传感器网络的删除信道中,我们使用一种称之为纠删码的编码方式,即发送端将 k 个数据包按某种方式编码成 $n(n > k)$ 个数据包后发送,接收端只要接收到 k 个或者 k 个以上的数据包便能译码成功^[9,10]。

本文首先详细分析了 RS 纠删码的工作原理,在 TinyOS^[7] 传感器网络操作系统平台上实现了基于 RS 纠删码的信息分发协议,然后比较了基于洪泛算法和基于 RS 纠删码的信息分发协议理论性能,最后在 TOSSIM^[8] 仿真平台上对该基于 RS 纠删码的信息分发协议进行了实验仿真。仿真结果表明,基于 RS 纠删码的信息分发协议比二次洪泛协议性能更优。

2 RS 纠删码的工作原理

RS 码全称 Reed-Solomon 码,是 MDS 码^[9,10],其编码和

译码基于矩阵运算。RS 码的码元来自于有限域 $GF(2^w)$ ，并且码元间的计算也是在该域上进行的，一般 w 较小时，码元间的乘法运算可以通过查表操作得到，加法运算则可以通过异或获得。我们设原始包数量为 k ，包长为 b 块，每块为若干字节，进行 RS 编码后的包数量为 n ，那么下式为 RS 纠错码的编码过程：

$$CodeMatrix_{(n,k)} \times DataMatrix_{(k,b)} = EncodeMatrix_{(n,b)} \quad (1)$$

式中， $CodeMatrix$ 是 n 行 k 列的编码矩阵，又叫生成矩阵。 $DataMatrix$ 是需要进行编码的 k 行 b 列的原始数据矩阵。 $EncodeMatrix$ 是行数为 n 列数为 b 的编码数据矩阵。这里我们定义拉伸系数 f 为 n 和 k 的比值，显然拉伸系数数值越大，冗余的数据报越多。如果设 $m=n-k$ ，那么图 1 形象地表示了该编码过程。

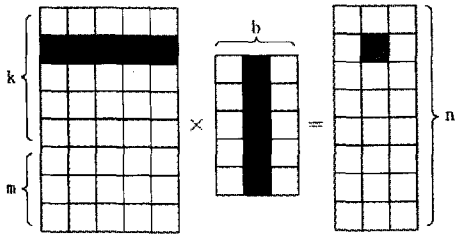


图 1 RS 编码过程图

下式为 RS 码的译码过程：

$$DecodeMatrix_{(k,k)} \times ReceivedMatrix_{(k,b)} = DataMatrix_{(k,b)} \quad (2)$$

式中， $ReceivedMatrix$ 是接收端实际接收到的编码数据矩阵，实际上就是 $EncodeMatrix$ 中的任意 k 行。也就是说它应该是由 $CodeMatrix$ 对应的 k 行生成的，我们将其设为 $CodeMatrix'$ ，从前面的编码过程可以看出：

$$CodeMatrix'_{(k,k)} \times DataMatrix_{(k,b)} = ReceivedMatrix_{(k,b)} \quad (3)$$

这样，将式(3)代入式(2)可得：

$$DecodeMatrix_{(k,k)} \times CodeMatrix'_{(k,k)} \times DataMatrix_{(k,b)} = DataMatrix_{(k,b)} \quad (4)$$

所以当且仅当 $DecodeMatrix$ 与 $CodeMatrix'$ 的逆相等时，式(4)成立。换句话说， $CodeMatrix$ 必须满足一个特性：任意的 k 个行向量都是线性独立的^[9,10]。

RS 码的一种构造方式是构造 Vandermonde^[11]，Vandermonde 行列式性质如下：

$$D_n = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{n-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{n-1} \end{vmatrix} = \prod_{n \geq i > j \geq 1} (x_i - x_j) \quad (5)$$

可以看出只要 x_i 和 x_j 不相等，那么 D_n 就不为 0，也就是说其 n 个行向量线性独立。

现在我们讨论构造矩阵 Vandermonde 矩阵 $G_{(n,k)}$ ，其中 $n \geq k$ ，并且 $i \neq j \Rightarrow x_i \neq x_j$ 。那么从矩阵 $G_{(n,k)}$ 中任意抽取 k 个行向量构成的矩阵 $G'_{(k,k)}$ 与 D_n 具有同样的性质，因此 $G'_{(k,k)}$ 中的任意 k 个行向量都是线性独立的。而在有限域 $GF(2^w)$ 中不同的元素有 2^w 个，那么 $G_{(n,k)}$ 的行数 $n \leq 2^w$ 。

生成矩阵 $G_{(n,k)}$ 产生的 RS 码并非系统码，而我们为了快

速地编码与译码，常常需要系统码，所以需要特殊的生成矩阵。系统码的生成矩阵形如 $G_s = [I|A^T]^T$ ，其中 I 为 $k \times k$ 的单位矩阵， A 为 $(n-k) \times k$ 的矩阵。因此，我们需要对矩阵 $G_{(n,k)}$ 进行系统化^[7]，将其化成 G_s 的形式。为了保证系统化的过程中不改变该矩阵任意 k 个行向量线性独立的性质，对 $G_{(n,k)}$ 可以实施行、列变换，而行变换的时候只能实施交换操作，其步骤如下^[8]：

(1) 假设前 $i-1$ 行已经进行了单位化 ($i < k$)，那么下一步在不改变前 $i-1$ 行的情况下对第 i 行单位化。如果第 i 行的第 i 个元素为 0，那么找到第 j 个行向量 ($j > i$)；同时其第 i 个元素不为 0，那么交换第 i 行和第 j 行。必然存在这样的第 i 行和第 j 行，否则前 k 行向量构成的矩阵是奇异矩阵。

(2) 令 $a_{i,i}$ 为第 i 行的第 i 个元素的值，那么有 $a_{i,i} \times a_{i,i}^{-1} = 1$ 。若此时 $a_{i,i} \neq 1$ ，则设第 i 个列向量为 C_i ，则令 $C_i = C_i \times a_{i,i}^{-1}$ 。

(3) 经过上述操作， $a_{i,i} = 1$ 。对于第 i 行的其他元素，若 $i \neq j$ 有 $a_{i,j} \neq 0$ ，则设第 j 个列向量为 C_j ，那么令 $C_j = C_j - a_{i,j} \times C_i$ 。

(4) 重复上述过程，直到前 k 个行向量构成单位矩阵。

从上面系统化的过程中可以看到，使用构造 Vandermonde 矩阵的方法来生成系统码需要额外花费时间。文献 [12] 给出了另外一种系统化方法，但是仍然需要相当的额外计算，为此引出 Cauchy 矩阵^[13]。

一个 $n \times n$ 的 Cauchy 行列式的 i 行 j 列的元素为 $a(i,j) = 1/(x_i + y_j)$ ，其有如下性质：

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{x_1 + y_1} & \frac{1}{x_1 + y_2} & \cdots \\ \frac{1}{x_2 + y_1} & \frac{1}{x_2 + y_2} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ \frac{1}{x_{n-1} + y_1} & \frac{1}{x_{n-1} + y_2} & \cdots \\ \frac{1}{x_n + y_1} & \frac{1}{x_n + y_2} & \cdots \end{vmatrix} = \frac{\prod_{i < j} (x_i - x_j) \prod_{i < j} (y_i - y_j)}{\prod_{i,j=1}^n (x_i + y_j)} \quad (6)$$

引理 1 如果一个 $m \times k$ 的柯西矩阵满足以下 3 个条件：

- i) $\forall i \in \{1, \dots, m\}, \forall j \in \{1, \dots, k\} \Rightarrow x_i + y_j \neq 0$ 。
- ii) $\forall i, j \in \{1, \dots, m\}, i \neq j \Rightarrow x_i \neq x_j$ 。
- iii) $\forall i, j \in \{1, \dots, k\}, i \neq j \Rightarrow y_i \neq y_j$ 。

那么，这个柯西矩阵任意子方阵都是非奇异矩阵。

定理 1^[9] 若一个生成矩阵 $G_s = [I|A^T]^T$ ，当且仅当矩阵 A 的任意子方阵都是非奇异矩阵时， G_s 的任意 k 个行向量线性无关。

设 $m = n - k$ ，由柯西矩阵构造 $n \times k$ 的系统码生成矩阵 $G_s = [I|A^T]^T$ 如下：

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ \frac{1}{x_1 + y_1} & \frac{1}{x_1 + y_2} & \cdots & \frac{1}{x_1 + y_k} \\ \frac{1}{x_2 + y_1} & \frac{1}{x_2 + y_2} & \cdots & \frac{1}{x_2 + y_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{x_m + y_1} & \frac{1}{x_m + y_2} & \cdots & \frac{1}{x_m + y_k} \end{vmatrix} \quad (7)$$

那么,只要子矩阵 A 满足引理 2.1, G_s 就满足定理 2.1。因此,对于一个编码块,若其编码包数为 k ,冗余包数为 m ,丢包率为 p ,那么使用 Vandermonde 矩阵的 RS 码的编码复杂度为 $O(k^3 + km)$,而译码复杂度 $O(k^3 + k^2 p)$ 。而在同样情况下,使用 Cauchy 矩阵构造的系统码生成矩阵不必系统化,编码的时间复杂度为 $O(km)$,这样便大大提高了编码效率。并且,在有限域 $GF(2^w)$ 中,若要满足引理 1,即 $m+k=n \leq 2^w$,则与使用 Vandermonde 矩阵作为生成矩阵一样, n 同样不会超过域的阶数。

3 基于 RS 纠删码的信息分发协议的设计和实现

基于 RS 纠删码的信息分发协议的是在 tinyOS-2.x 上实现的。协议的报文结构 message_t 一般包括 header、footer、metadata 和 data 4 个部分,其中前 3 个与硬件相关,协议一般使用 data 部分,该部分最大长度为 29 个字节。为了进行 RS 编码,需要知道节点号、数据包号。如果在传输过程中接收方并不知道发包数量和码率,那么还需要在 data 中设置原始数据包数(sour_num)和编码后的数据包数(code_num)。消息 message_t 的结构如图 2 所示。

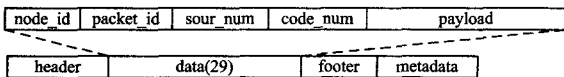


图 2 基于 RS 纠删码的 message_t 图

由于 RS 纠删码的编解码是基于矩阵的有限域运算,复杂度较高,因此为了降低计算量,编码后的数据包数一般控制在 256 个以内。在实际使用中,当数据量较大的时候就需要将数据分块处理了。图 2 是有关 RS 信息分发协议编解码的具体过程:

Notations:

CodeMatrix, DataMatrix, ..., CodeMatrix': defined before
M: message N: threshold to divide message
receive_packet: receive queue decode_packet: message decoded
Information Dissemination Protocol Based RS Erasure Codes

```
(1) Upon entering Encode Phase
    if(TOS_NODE_ID == Sender) then
        call Encode() and Send()
    end if

(2) Upon entering Forward Phase
    if(TOS_NODE_ID != Sender && TOS_NODE_ID != Receiver) then
        call Forward()
    end if

(3) Upon entering Decode Phase
    if(TOS_NODE_ID == Receiver) then
        if( len(receive_packet) >= k) then
            call Decode() and clean up receive_packet
        else
            Store the message in receive_packet
        end if
    end if
    /* The following is for Encode */

(4) Encode()
    Initializing the message M
    if len(M) > N then
        divide M into blocks of length N
```

```
end if
Construct look-up table and index table
Construct the generator matrix CodeMatrix
Acquire EncodeMatrix by CodeMatrix multiply DataMatrix
/* The following is for Decode */
(5) Decode()
Construct part of the generator matrix CodeMatrix'
Derive DecodeMatrix by inverse CodeMatrix'
if(! DecodeMatrix)
    return FAIL
end if
i=0
while i != k do
    if receive_packet->id < k then
        i is the original data packet
    else
        decode_packet = receive_packet * DecodeMatrix
        ++i
    end if
end while
return SUCCESS
```

图 2 RS 信息分发协议

基于 RS 纠删码的信息分发协议的实现是采用 TinyOS 的组件化方法实现的,组件结构图如图 4 所示。图中,galoisC 与 rsC 是为实现 RS 纠删码精心设计的两个组件,galoisC 组件用于完成有限域的构造以及有限域的乘除运算,rsC 则用于 RS 码的编码和译码。MainC 和 RSCountToLedsC 实现了编码信息的接收和分发功能。其余组件是系统自带的组件,完成活跃消息 (Active Message) 的接收和发送,以及消息发送中的随机化处理和 LED 显示控制。

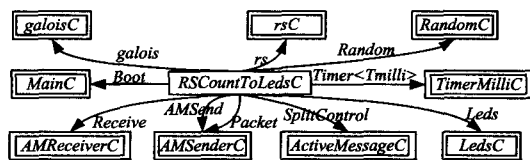


图 4 基于 RS 纠删码的信息分发协议的组件结构图

4 基于洪泛算法和 RS 纠删码的信息分发协议分析

洪泛算法基于广播算法,在该算法中,数据发送方不需要和数据接收方进行握手。在某个的时间段内,发送方不断重复发送数据包,并期望以此方式满足不同的网络丢包率的情况。接收方在接到数据包后以同样的方式进行转发。由于接收方在接收到数据包后不会发送应答,故停止发送数据包的时间完全由发送方决定。发送数据包的时间、发送数据包的次数是基于洪泛算法信息分发协议设计的重点。为了防止信道冲突,竞争同一信道的发送方发送数据包的时间应该交错。同时为了降低网络负载,在满足数据传输的要求下要尽量减少数据包的重发次数。

如果设丢包率为 p ,接收方能接收到所有数据包的概率为 $P_{success}$,发送原始数据包数为 k ,洪泛次数为 r ,那么只要存在同一个包 r 次发送都失败,则此次洪泛便可认为失败,所以:

$$P_{success} = 1 - C_k^1 (p^r)^1 + C_k^2 (p^r)^2 - C_k^3 (p^r)^3 + \dots + C_k^k (1 - p^r)^k = (1 - p^r)^k \quad (8)$$

而进行 RS 编码后,若拉伸系数为 f , 编码数据包个数为 n 。我们假设发送方在发送一次的情况下,接收方能接收到 k 个不同的编码数据包的概率为 $P_{success}$, 那么就有:

$$P_{success} = C_n^k p^{n-k} (1-p)^k + C_n^{k+1} p^{n-k-1} (1-p)^{k+1} + \dots + C_n^0 p^n (1-p)^0 \quad (9)$$

因此,在单跳传输中,使用二次洪泛的 $P_{success}$ 和使用拉伸系数为 f 的 $P_{success}$ 与 p 的关系如图 5 所示。

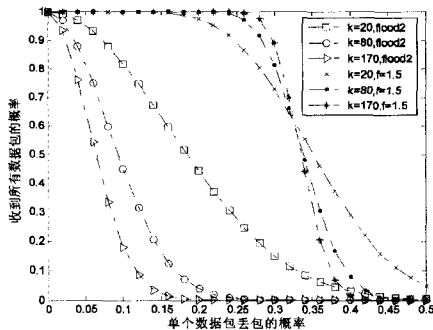


图 5 丢包率与接受方接受数据成功的概率关系图

从图 5 可以发现,在同样的数据包数量下,基于 RS 纠错码的信息分发协议可以在更低的传输可靠性下工作,与无应答的传统二次洪泛相比,明显降低了网络负载。由此可以预见单路径的情况下,无论单跳还是多跳,基于 RS 纠错码的信息分发协议性能均明显优于简单的洪泛算法。由于实际网络多数为多路径分发,不适合从理论上进行分析,因此针对多跳多路径的情况,对洪泛算法和基于 RS 纠错码的信息分发协议进行模拟仿真。

5 模拟结果比较

本节在 TinyOS^[7] 平台上实现了基于 RS 纠错码的信息分发协议,然后再用 TOSSIM^[8] 模拟了协议的性能。文中用来测试的无线传感器网络拓扑图(见图 6)是随机生成的,该图的 0 节点为 sink 节点,用于分发数据,其余 63 个节点用于转发数据,接收方在接到数据包后,如果该包已经收到了,那么简单丢弃,否则以同样的方式进行转发。由于接收方在接收到数据包后不会发送应答,故停止发送数据包的时间完全由发送方决定。

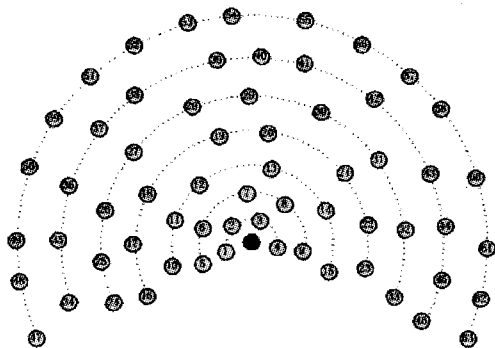


图 6 实验采用的无线传感器网络拓扑图

在仿真试验中的 RS 纠错码的拉伸系数为 1.5,即冗余数据包的数量是原始数据包的 0.5 倍。仿真主要用来评测译码成功率和网络负载,译码成功率指的是成功收到所有原始数据包(洪泛算法的信息分发协议)或通过译码还原出所有原始数据包(基于纠错码的信息分发协议)的节点百分比。图 7 和

图 8 分别显示了译码成功率和网络负载与数据包数的关系。

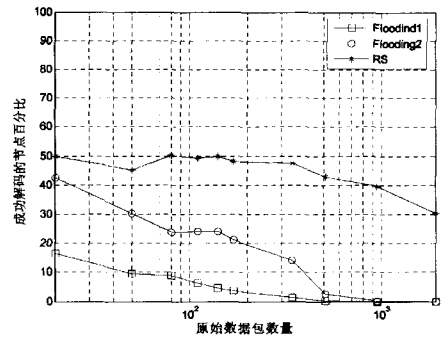


图 7 原始数据包数量和成功译码的节点的比的关系

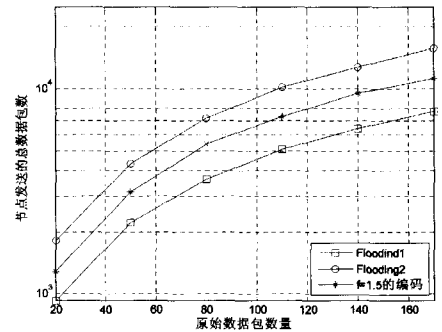


图 7 原始数据包数量与节点发送总数据包数的关系

从图 7 和图 8 中可以看到,基于 RS 纠错码信息分发协议,不仅网络的负载低于基于二次洪泛的协议,而且其能够成功译码的节点数百分比也大于二次洪泛协议。进一步随着拟发送数据包数的增加,优势越发明显。

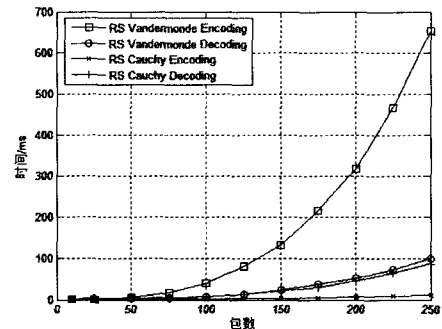


图 9 RS 信息分发协议编码和解码时间对比曲线

图 9 所示是采用前面介绍的 Vandermonde 矩阵和 Cauchy 矩阵构造系统码生成矩阵后,RS 信息分发协议编码和解码时间对比曲线。每个数据包的 payload 部分为 20 个 Byte,可以看到采用 Cauchy 矩阵构造生成矩阵的方法明显降低了 RS 纠错码的编码时间,而译码由于要进行矩阵求逆等一系列运算,会随着数据包数增多,时间略有增加。这与前面我们分析的采用 Cauchy 矩阵构造生成矩阵的方法编码的时间复杂度将由 $O(k^3 + km)$ 降为 $O(km)$ 一致。从上图我们还可以看出,由于 RS 纠错码信息分发协议译码的复杂度较高,当发送的数据包数较多时,应该进行分块发送,且每块的包数大小应该不大于 250,设为 200 较为合适。

结束语 本文在 TinyOS 操作系统上设计和实现了基于 RS 纠错码的信息分发协议,并且在单跳情况理论分析了协议的性能,随后通过在 TOSSIM 上仿真,比较了该协议和基于

(下转第 322 页)

采用延迟容忍网络(DTN)和机会网络来分析移动节点间难以建立稳定端到端路由的间歇连通网络的问题。节点在延迟容忍网络中采用存储转发(store and forward)的方式,节点存储(store)数据包移动,直到遇到比自己更有机会可以帮助数据包传递至目标的移动节点时,将数据包转发(forward)至该节点。

因此,针对车载传感器网络的特性,解决诸如节点快速移动性、拓扑变化频繁和资源有限等因素,是设计和开发路由算法的关键。

4.4 基于真实环境的仿真平台

如何在真实的环境中测试及评估通信协议(protocol implementation)却是一项艰巨的任务,在 VSNS 的研究中“网络模拟”仍是最常被用来作为通信协议发展的第一步。现今已有数项通信网络模拟工具提供了一个可供测试评估的网络通信平台,例如 NS-2, OPNET 以及 Qualnet。然而,这些工具通常用来提供一般状况的网络模拟而缺乏应用于为交通运输环境特别设计的模拟工具。另一方面,在交通运输上,模拟也同时扮演了另一个重要的角色。不同种类的交通模拟工具,例如:PARAMICS, CORSIM 以及 VISSIM, 已经被广泛发展用来分析宏观和微观的交通状况模拟。然而,在过去却很少研究着力将交通模拟和网络模拟整合起来去创造一个适合 VSNS 研究的模拟环境。因此,建立一个基于真实环境的仿真平台对于 VSNS 而言具有重要的现实意义。

结束语 车载传感器网络是建立在车载自组织网络基础上的无线传感器网络,其特点是节点具有高速移动性,网络呈现间歇连通性以及网络拓扑变化频繁等,因此传统的无线传感器网络的研究无法直接应用在 VSNS 中,必须结合 VSNS 的特点设计新的协议。目前 VSNS 的研究才刚刚起步,研究

热点也非常丰富。随着智能交通技术的发展,车载传感器网络必将得到广泛的应用。

参考文献

- [1] Wisitpongphan N, Bai F, Mudalige P, et al. On the routing problem in disconnected vehicular ad hoc networks[C]// Proc. of 26th IEEE International Conference on Computer Communications. New York: IEEE Communications Society, 2007; 2291-2295
- [2] Rudack M, Meincke M, Lott M. On the dynamics of ad hoc networks for inter vehicle communication(IVC)[C]// Proceedings of the ICWN. 2002
- [3] 陈立家, 江昊, 吴静, 等. 车用自组织网络传输控制研究[J]. 软件学报, 2007, 18(6): 1477-1490
- [4] 熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137
- [5] Guizzo E. Network of Traffic Spies Built Into Cars in Atlanta [J]. IEEE Spectrum, April 2004
- [6] CarTel[EB/OL]. <http://cartel.csail.mit.edu/doku.php>
- [7] Nadeem T, Dashtinezhad S, et al. TrafficView: Traffic data dissemination using car-to-car communication[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(3): 6-19
- [8] ITS Standards[EB/OL]. <http://www.standards.its.dot.gov>
- [9] <http://www.omniar.org/vii/>
- [10] Reichardt D, Miglietta M, et al. Cartalk 2000-safe and comfortable driving based upon inter-vehicle communication[C]// Proceedings of IEEE IV'02. June 2002; 545-550
- [11] NoW: Network on wheels[EB/OL]. <http://www.network-on-wheels.de>, 2006

(上接第 318 页)

洪泛算法的信息分发协议的性能。从仿真结果可以得出,基于 RS 纠错码的信息分发协议在原始数据包较少的情况下,能以拉伸系数 1.5 的编码比率超过基于两次洪泛算法的信息分发协议。该协议在降低了网络负载的同时,也降低了对网络传输可靠性的要求。由于 RS 纠错码的编解码复杂度较高,因此需要对数据分块编码发送。为了提高编码的速度,我们将研究使用线性时间内编译码的纠错码的信息分发协议,这是我们下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(07)
- [2] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(01)
- [3] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [4] Li Mo, Liu Yun-hao. Underground Coal Mine Monitoring with Wireless Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks(TOSN), 2009, 5(2)
- [5] Mo Lu-feng, He Yuan, Liu Yun-hao, et al. Canopy Closure Estimates with GreenOrbs: Sustainable Sensing in the Forest[C]// ACM SenSys 2009. Berkeley, California, USA, November 2009

- [6] 杜军朝, 刘惠, 陈平, 等. 无线传感器网络中基于链路层服务的最可靠路由路径建立算法[J]. 自动化学报, 2007, 12(33)
- [7] Levis P, Madden S, Gay D, et al. The emergence of networking abstractions and techniques in Tinyos[C]// Proceedings of the First USENIX/ACM Networked System Design and Implementation. 2004; 1-14
- [8] Levis P, Lee N, Welsh M, et al. TOSSIM: Accurate and scalable simulation of entire Tinyos applications[C]// Proceedings of the 1st international conference on embedded networked sensor system. 2003; 126-137
- [9] MacWilliams F J, Sloane N J A. The Theory of Error-Correcting Codes[M]. Part I. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1977
- [10] 王新梅, 肖国镇. 纠错码-原理与方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001
- [11] Plank J S. A Tutorial on Reed-Solomon Coding for Fault-Tolerance in RAID-like Systems[J]. Software-Practice & Experience, 1997, 27(9): 995-1012
- [12] Lacan J, Fimes J. Systematic MDS Erasure Codes Based on Vandermonde Matrices[J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(9)
- [13] Plank J S, Ding Y. Note: Correction to the 1997 tutorial on Reed-Solomon coding[J]. Software-Practice & Experience, 2005, 35(2): 189-194