

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003134

基于纠删码的海洋无线传感器网络丢包恢复方法^{*}

程 群^{1,2} 陈为刚^{1,2} 巩 峰² 王 伟²

(1. 天津大学 微电子学院 天津 300072; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室
海洋观测与探测联合实验室 青岛 266237)

摘 要:针对无线传感器网络在恶劣海洋环境下存在的严重丢包问题,设计并实现了一种低复杂度的基于里德-所罗门(RS)码的丢包恢复方法。具体而言,发送节点对信息数据包进行分析,进一步利用 RS 码编码生成并插入少量的冗余数据包,可以保证数据包的顺序发送,同时利用较少的资源编码生成了冗余校验数据包。接收节点基于接收的信息数据包与校验数据包,通过 RS 码对丢失的数据包进行纠删恢复。在陆地和海洋两种复杂信道中测试提出的方法,以丢包率(packet loss rate, PLR)作为 RS 码丢包恢复方法性能的度量指标。测试结果表明,采用低复杂度的 RS 码丢包恢复方法能降低信道衰落影响的丢包率,保证了数据在严重丢包情况下的完整性,提高系统的可靠性。

关键词:无线传感器网络;丢包率;RS 码

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Packet loss recovery with erasure correction codes in marine wireless sensor networks

Cheng Qun^{1,2} Chen Weigang^{1,2} Gong Feng² Wang Wei²

(1. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Joint Laboratory for Ocean Observation and Detection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: Aiming at the serious packet loss problem in the harsh marine environment of wireless sensor networks, a low complexity packet loss recovery with Reed-Solomon codes is designed and implemented. Specifically, the sending node analyzes the information data packet, it further generates and inserts a small number of redundant data packets using RS codes encoding, which can ensure the sequential transmission of the data packets, and generates redundant check data using fewer resource encodings. Based on the received information data packet and check data packet, the receiving node corrects and restores the lost data packet through the RS codes. The proposed method is tested on two complex transmission channels, terrestrial and marine, and the packet loss rate (PLR) is established as a metric for the packet loss recovery with RS codes. The test results show that the low complexity packet recovery method with RS codes can reduce the packet loss rate affected by channel fading, ensure data integrity under severe packet loss, and improve system reliability.

Keywords: wireless sensor networks; packet loss rate (PLR); RS codes

0 引 言

海洋无线传感器网络是融合了多跳无线通信、嵌入式和信息处理等交叉技术,并由大量微型传感器节点组

成的分布式网络系统,具有灵活性高、成本低、自组织性高等优势。其主要用于采集、处理和传输网络覆盖区域内的海洋环境数据^[1-4]。电磁波在海洋无线信道中传输时,多径传播引起的小尺度衰落、节点失效、链路中断、路径损耗、阴影效应等因素^[5-6]都容易导致数据包的丢失,

影响了系统的可靠性。因此,降低海洋无线传感器网络中无线数据传输的丢包率,提高系统的可靠性成为亟待解决而又具有挑战性的问题。

目前海洋无线传感器网络在降低数据传输丢包率、提高系统可靠性问题的研究主要集中在两个方面^[7],分别是数据链路层的重传和确认机制(automatic repeat-request, ARQ)和前向纠错技术(forward error correction, FEC)。在较高分组丢失率情况下,文献[7-8]都选择重传和确认制提高数据传输的可靠性,但是重传会增加信道竞争,还可能会继续恶化拥塞,导致大量数据包丢失、网络吞吐率降低。鉴于此,国内外学者对利用前向纠错技术实现数据传输可靠性进行广泛的研究。文献[9]在无线传感器网络的端对端传输中使用冗余编码机制,该机制能够在降低传输时延情况下,提高数据传输可靠性。文献[10]在射频物理参数(如 LQI、RSSI 和 SNR)与数据分组接收率之间建立一种关系模型,通过物理参数预测数据接收率。文献[11]通过 RSSI 筛选无线传感器网络的中继节点,并结合网络编码传输机制,在减少重传次数的同时,提高数据包的传输可靠性。此外,一些研究通过引入纠删码来提高可靠性,文献[12-13]提出一种以数据为中心的分散纠删码(DEC)方案,该方案在传感器节点发生异常的情况下,用户通过评估硬件和数据的冗余度方式确定数据存活能力,实现对预期传输数据的恢复,进而提高数据可靠性。文献[14]提出一种基于安全等级划分的分组交织方案,在网络受到严重干扰时,该方案使用 RS(Reed-Solomon)码将数据编码成高可靠性和非高可靠性数据,通过安全等级的划分,能够提高数据传输可靠性、降低编码功耗。文献[15]提出一种结合了错误确认、部分编解码的自适应选择重传和链路质量预测的新方案。当错误确认机制面对比较严重的突发干扰时,该方案可以基于对链路质量的预测,使用重传和自适应码率的方式提高数据传输可靠性。

以上有关无线传感器网络中可靠性的研究重点是在重传、降低消息传输时延、预测和编码机制几个方面,并且均具有较高复杂度,不适用于资源受限的海洋无线传感器网络。海洋无线传感器网络需要准确、实时获取海洋环境数据,但是无线传输易受到多径衰落、路径损耗、节点失效等因素影响^[5-6],丢包问题比较严重。由文献[7-8]可知,重传会带来传输时延较高以及开销较大的问题。所以为了在降低系统丢包率、传输时延和减少资源消耗之间实现灵活折中,需要复杂度更低的方法。针对上述问题,本文提出一种基于 RS 码的丢包恢复方法。在无线传感器网络单跳路径中,发送端先进行 RS 码编码,然后将编码生成的冗余包添加数据包组中,不仅能提高数据包组的整体丢包恢复能力,还能让顺序发送的原始数据包参与到编码运算过程。接收端基于接收的数据

包组,恢复 RS 码纠删能力之内的丢包。因此,RS 编码并没有带来额外开销,适用于复杂度低的传感器节点。最后,在陆地和海洋不同场景下,通过改变收发端之间的距离,测试在不同数据包接收率下,RS 码丢包恢复方法的性能。

1 基于 RS 码的丢包恢复方法

在海洋无线传感器网络中,传感器节点的天线较低,受导电的海水影响较大,并且传感器节点一般处于不断的运动中,尤其是海况复杂时,电磁传输环境更为恶劣。上述因素严重影响了海洋无线链路传输性能,容易造成数据丢包问题。而目前无线传感器网络都是基于数据包的传输方式,在不考虑射频模块传输距离极限条件下,相邻数据包的传输是相互独立的,丢失的数据包并没有表现出明显的相关性。在某些特殊情况下,例如信道发生拥塞或者存在短时的强干扰等,数据会呈现突发丢包特性^[16-17]。由此可知,在复杂的海洋无线信道下,无线传输中数据丢包具有随机性和突发性特点。RS 码是一类最大距离可分码,可以获得最优的纠删性能^[18-19],因此,本文提出将 RS 码应用于对抗海洋无线传感器网络的丢包问题。

1.1 传感器节点基于 RS 码的发送过程

RS(n, k)码是一种非二进制 BCH 码,具有最优的纠删能力^[20]。在 RS(n, k)码中, n 表示码长, $n = 2m - 1$, k 为信息位长度, $n - k$ 为最大纠删数,码率用 k/n 表示。考虑到数据包一般按照字节进行组织,并且采用纠删码之前的错误率一般大约在 10^{-2} 。因此,本文选择码长为 255 bytes,码率为 247/255,纠删能力为 8 的 RS(255, 247)码,即编码后的 RS 码字大小为 255 bytes。在实际海洋无线传输过程中,在 400~800 m 距离内,平均单路最大丢包率可达到 4.19%;当发送端以 255 包数据作为一个数据包组发送时,接收端连续 255 个数据包的丢包数量一般低于 8 包,丢失数据包之间较为稀疏,没有表现出连续性丢包特性,因此可以采用设计的 RS 码进行纠正。在超过 1 300 m 距离时,接收端丢包数量大于 8 包,在数据包组内是以突发性丢包为主,也会出现非相关性丢包问题。所以本文 RS 码的码率是基于理论和实际测试过程中数据丢包特点确定的。

传感器节点原始数据包长为 18 bytes。首先缓存数组中依次放入 247 包原始数据,然后使用 RS 码编码生成 8 包冗余数据,共计得到 255 包编码数据。在 RS 码丢包恢复方法中,数据的编码、传输以及解码过程都是以 255 个数据包组成的分组为单位进行。

传感器节点 RS 码编码具体步骤如下。

1) 传感器节点在按顺序发送 247 个原始数据包的同时,将其缓存在数组 D (255×18)中。然后对数组 D 内

247 包数据按列进行 18 次的 RS 码编码运算,分别生成 8 个校验字节。最后,将生成的 18 列校验字节依次放入 D 中 18×8 bytes 数组缓存。

2) 将 18 列校验字节按行组成 8 个冗余数据包,完成 247 包数据编码成 255 包数据过程。

图 1 所示为传感器节点 RS 码编码流程,式(1)中 c 代表编码后的数据包组, $c = \{c_i\}$, 其中 $i \in \{0, 1, 2, \dots, 254\}$ 。 d 代表信息数据包, d_i 表示第 i 个信息数据包, 其中 $i \in \{0, 1, \dots, 246\}$ 。 p 代表冗余数据包, p_i 可用包运算公式 $p_i = f_p(\{d_i\})$ 表示, $i \in \{247, 248, \dots, 254\}$, f_p 完成

的是数据包组 d 到第 i 冗余包的运算。所谓数据包组的包运算,其实就是在相同位置下,数据包组内字节之间的运算问题。 f_w 表示是字节运算过程,也可以用公式 $p_{is} = f_w(\{d_{ks}\})$ 表示, p_{is} 表示第 i 个冗余数据包的第 s bytes, d_{ks} 表示第 k 个数据包中的第 s 个字节, $i \in \{247, 248, \dots, 254\}$, $k \in \{0, 1, \dots, 246\}$, $s \in \{1, 2, \dots, 18\}$ 。如 RS 码编码步骤 1 所示,每列字节运算都会生成 8 个冗余字节,将冗余字节放入数据包组对应列中。

$$c_i = \begin{cases} d_i, & i \in \{0, 1, \dots, 246\} \\ p_{i-k}, & i \in \{247, 248, \dots, 254\} \end{cases} \quad (1)$$

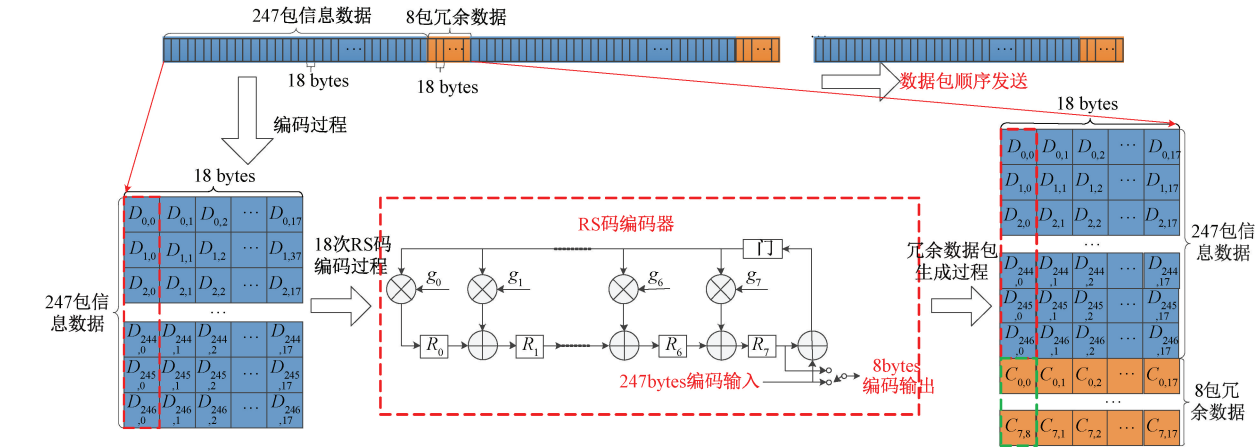


图 1 传感器节点 RS 码编码流程

Fig. 1 Process of sensor node RS codes encoding

1.2 传感器节点数据格式与顺序发送

基于 RS 码的丢包恢复方法,传感器节点数据格式共有两种,分别是用户帧和传输帧。其中,对 RS 码编码后数据再添加帧号和 CRC 校验位,生成的数据即为用户帧。用户帧主要包括帧号、信息序列和 CRC 校验位 3 部分,如图 2(a)所示。为了增强无线传感器网络数据传输的可靠性,将用户帧经过 Turbo 编码、交织和分包过程后

进行发送,传输帧的长度设置为 15 bytes。图 2(c)为传输帧,也是物理层数据帧结构中的有效载荷部分,主要包括数据帧号、帧内包号和信息序列 3 部分。其中,数据帧号与用户帧的帧号相同,帧内包号是分包传输的数据序号。为了保证无线传输过程中数据帧号和帧内包号的准确性,对两者分别进行了 8 次重复编码。

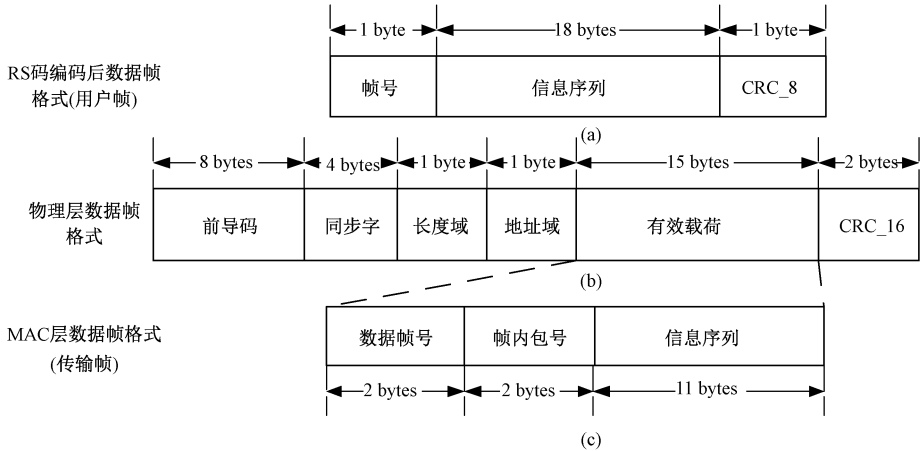


图 2 传感器节点发送的数据帧格式

Fig. 2 Data frame format sent by the sensor node

传感器节点物理层数据帧格式如图 2(b) 所示,在接收数据包之前,需要依次进行前导码检测、同步字检测、长度判断、地址过滤和 CRC 校验判断是否接收该数据包,可以有效减轻微控制器的负荷。

1) 前导码,在物理层数据帧格式中,前导码作用就是对接收机前导码序列进行有效监测,使接收机在接收和处理信息序列前快速进入稳定状态,避免有效数据丢失。

2) 同步字,在寄存器 SYNC1 和 SYNC0 中使用 2 bytes 设置同步字,完成对输入数据字节同步的作用。

3) 长度域,表示数据有效载荷长度,物理层数据帧支持固定数据包长度协议和可变数据包长度协议。

4) 地址域,接收机射频模块中会有地址滤波的功能,如果接收到地址匹配是有效地址,则接收该数据包。如果失败就会丢弃该数据包,并重启接收模式。

5) 有效载荷,物理层的有效载荷表示的是 MAC 层传输帧。

6) CRC₁₆,接收端首先计算数据帧的 CRC₁₆ 校验码,然后与接收数据帧中的 CRC₁₆ 码比较,如果相同就判断数据包正确,否则就是错误数据包。

7) 数据帧编号,发送端 MAC 层数据帧中的帧号信息。

8) 帧内包号,用户帧通过分包传输方式进行发送,使用帧内包号区分不同数据包之间的次序,方便接收端的组帧过程。

9) 信息序列,用户帧的部分原始数据包和冗余数据包信息。

1.3 基于 RS 码的汇聚节点接收处理流程

汇聚节点 RS 码丢包恢复方案主要包括接收分包传输的数据包、帧头恢复、数据合并、解交织、Turbo 译码组帧^[17]以及具体 RS 码译码流程。图 3 所示为汇聚节点丢包恢复的流程,在收到组帧数据之后,汇聚节点依次完成包括 CRC 校验、数据包组检测、统计丢包总数、丢包译码检测和 RS 码译码等步骤,最后将丢包恢复的结果输出至上位机显示。具体步骤如下。

1) 打开串口后,首先接收分包传输的数据包,然后是帧头恢复过程,该过程对 8 次重复编码后的帧号和帧内编号分别进行译码,进而得到数据包的帧号与帧内编号。在数据合并过程中,通过检测数据帧编号判断是否为同一用户帧,进而通过帧内包号确定同一用户帧的顺序,并以此顺序对用户帧的信息序列进行合并。最后,经过解交织与 Turbo 译码组帧过程生成用户帧,将用户帧发送到以下具体 RS 码译码流程。

2) 在具体 RS 码译码流程中,通过 CRC 校验结果分为 3 种情况。

(1) 对步骤 1) 恢复出的数据包再次生成新的 CRC

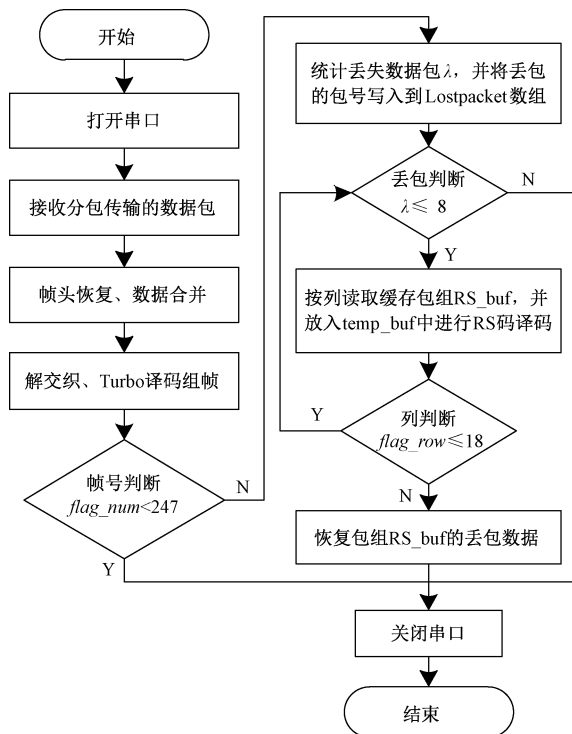


图 3 汇聚节点丢包恢复流程

Fig. 3 Flow chart of sink node packet loss recovery

校验位,并与该数据包中的 CRC 校验位相比较。如果比较结果不一致,则数据包错误,根据包号将数据包缓存在数据包组 RS_{buffer} 对应位置上。

(2) 检测数据包号是否连续,确定丢失数据包的位置。若当前包号与前一个相邻包号不连续,则可以基于相邻数据包的包号差值确定丢失位置,并在数据包组 RS_{buffer} 相应位置上缓存该数据包的包号信息,仅在第 1 byte 位置添加包号,其余位置均赋值为 0。然后将丢包的包号缓存在数组 Lostpacket 中。

(3) 若比较结果一致,则该数据包是正确的,同样根据包号信息将数据包缓存在数据包组 RS_{buffer} 对应位置上。

3) 在 RS 码译码前,需要接收同一个数据包组的所有数据包。如果缓存数据包组 RS_{buffer} 中循环接收的数据包数量 $flag_num < 247$,则超出 RS 码纠错能力范围,直接接收的正确信息数据包,反之则进行 RS 码译码。

4) 若循环接收数据包总数 $flag_num \geq 247$,统计丢包总数 λ 以及包号,其中包号可为 RS 码译码过程提供纠错位置信息。本方法将错包视为丢包进行统计。

5) 当缓存数据包组 RS_{buffer} 接收到完整数据包后,根据步骤 4) 可知,数组组每一列都会出现 λ 个错误字节。如果丢包总数 $\lambda \leq 8$,基于数组 Lostpacket 中的丢包位置信息,再完成 18 次 RS 码译码能够正确恢复出对应

位置丢失的字节,进而恢复出丢失的数据包。译码后包组的前 247 个数据包即为信息数据包。如果丢包总数 $\lambda>8$, λ 就超出了 RS 码纠错能力范围,无法恢复出丢失数据包,只得到包组内正确的数据包,并关闭串口。

2 系统测试与结果分析

为了验证基于 RS 码丢包恢复方法应用于无线传感器网络的性能,在陆地和海洋环境下对 RS 码丢包恢复方法进行了测试。在测试过程中,通过增大收发端之间的距离,改变接收端数据包接收率。采用 RS 码丢包恢复方法目的是在复杂有扰信道传输过程中恢复丢失数据包,所以本文以丢包率作为 RS 码丢包恢复方法性能的度量指标。最后,对陆地和海洋环境下 RS 码丢包恢复结果进行了分析。

2.1 陆地环境基于 RS 码的丢包恢复测试与分析

基于传感器节点和汇聚节点的硬件平台,在陆地环境开展实际测试。为了测试在复杂信道环境下 RS 码丢包恢复方法的性能,通过选择有障碍物遮挡的视距传输路径和增大收发端距离两种方式使得汇聚节点数据接收率明显降低。最后,根据汇聚节点统计的收包数和丢包数据信息,分别绘制了距离-平均收包数、距离-丢包间隔和距离-丢包率曲线,以便更有效对 RS 码丢包恢复方法的性能进行分析。

1) 陆地测试场景设置

在陆地测试场景中,传感器节点的地点选择在实验园区外的空旷地,汇聚节点的地点选择在园区内。陆地测试场景如图 4 所示,收发端之间传输路径会有树木等障碍物遮挡。由于射频模块 CC1101 本身传输距离限制,所以基于该条件总共确定 7 个测试位置。接收端位置选择固定不变,收发端距离从 500 m 开始,每增加 100 m 改变一次发送端位置。分布式接收采用了 4 根具有 10 dBi 增益的全向天线,通过 SMA(sub miniature A)接口与射频模块 CC1101 连接,并将天线固定在三脚架上,相邻天线间隔为 1 m 距离,天线的高度为 1.5 m,以获取较大范围信号覆盖区域。在陆地测试系统搭建完成后,对天线的方位角度进行微调,使得信号质量最优。为了保证传感器数据传输可靠性,设置射频模块 CC1101 功率为 10 dBm,射频单元 CC1101 的主要寄存器参数配置如表 1 所示。

2) 陆地环境 RS 码丢包恢复性能分析

在陆地环境测试中,每个测试地点发送 17 850 包数据,相当于发送 70 组数据包。图 5 所示为不同收发端距离下,统计接收端在平均单路和四路合并条件下,数据包组的丢包数。其中,平均单路和四路合并总接收组数分别应为 280 和 70。图 6 所示为不同收发端距离下,统计

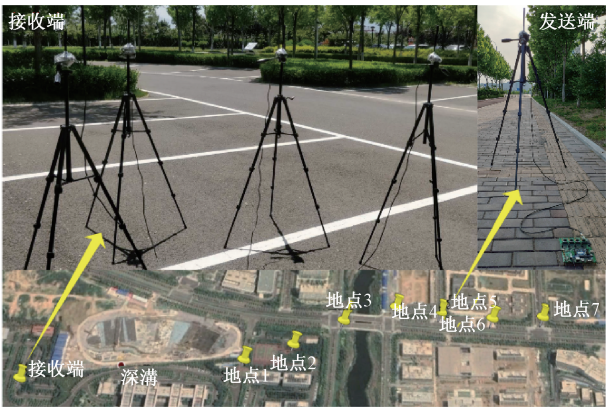


图 4 陆地测试场景
Fig. 4 Land test scenario

表 1 CC1101 主要参数配置

Table 1 The main parameters configuration of CC1101

参数名称	值
工作频率/MHz	433
调制解调方式	GFSK
波特率/Kbps	10
前导字长度/bytes	8
同步检测模式	30/32
发射功率/dBm	10
是否使用 PA	是
数据包长度/bytes	15

在平均单路以及四路合并下,数据包组的丢包间隔。图 7 所示为不同收发端距离下,采用 RS 码丢包恢复方法后,平均单路和四路合并的丢包率。基于陆地测试结果,以丢包率作为评价指标对 RS 码丢包恢复方法性能进行分析。

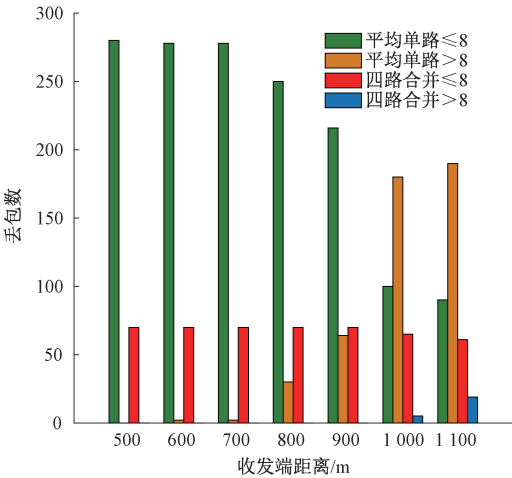


图 5 陆地测试在不同收发端距离下丢包数
Fig. 5 The number of packets lost by the land test under different distances between the transceiver

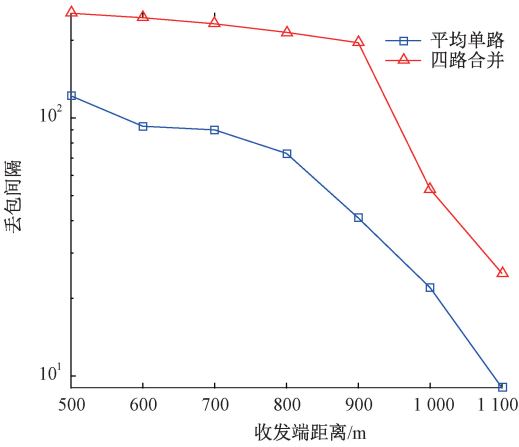


图 6 陆地测试在不同收发端距离下丢包间隔

Fig. 6 The packet loss interval by the land test under different distances between the transceiver

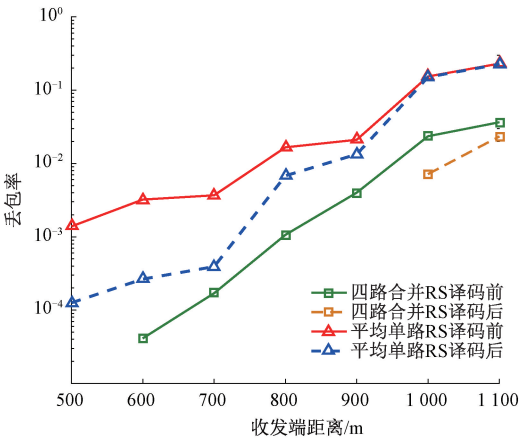


图 7 陆地测试在不同收发端距离下丢包率

Fig. 7 The packet loss rate by the land test under different distances between the transceiver

由结果可知,随着收发端距离的增大,接收端数据包的接收成功率也会随之降低,并且丢包特性从随机性丢包为主转变到以突发性丢包为主。收发端距离在 500 m 范围内可以实现无差错的丢包恢复。在 500~900 m 距离以内,平均单路数据包的丢包数量以 ≤ 8 包为主,最大丢包率可达到 2.11%,丢包间隔为 41 包,采用 RS 码丢包恢复方法能使丢包率降低至 1.34%;四路合并数据包的丢包数量同样以 ≤ 8 包为主,最大丢包率为 0.4%,丢包间隔为 196 包,采用 RS 码丢包恢复方法能够完全恢复出四路合并的丢包数据。在 900~1 100 m 区间内,各个天线接收到信号强度比较弱,数据丢包率较高。其中,在 1 100 m 位置时,平均单路和四路合并的最大丢包率分别为 23.02%和 3.65%,平均单路数据包的丢包数量以大于 8 包为主,丢包间隔为 9 包,此时很难通过 RS 码

对丢包数据进行恢复。而四路合并数据包的丢包数量以 ≤ 8 包为主,丢包间隔为 25 包,通过采用 RS 码丢包恢复方法将丢包率降低至 2.34%。

2.2 海洋环境基于 RS 码的丢包恢复测试与分析

与陆地环境相比,海上的信道环境更加复杂。海面的镜面反射和漫散射引起的多径分量会导致海上无线电波传输损耗的小尺度衰落^[3]。与此同时,基于浮标硬件测试平台的传感器节点会随着海面的波动导致晃动,引起天线俯仰角、横摇角^[4]的改变,导致无线电波的传输损耗。在不同收发端距离下,系统受到海洋小尺度衰落和晃动的影响不相同。基于此,海洋测试同样通过收发端之间的距离变化,改变接收端数据接收率,并对结果进行分析。

1) 海上测试场景设置

在海上测试场景中,选择的测试地点是山东青岛的近海海域。测试当日海上风力范围在 2~3 级,天气晴朗并且雾气较小,浪高在 0.8 m 左右,平均气温在 16 ℃,具体海洋气象与水文参数如表 2 所示。

表 2 海洋气象和水文参数

Table 2 Marine meteorological and hydrological parameters

参数名称	值
浪	0.5~1.1 m
气温	10 ℃~21 ℃
海温	8.4 ℃
风速	6.7~8.4 m/s

基于无线传感器网络系统在陆地测试的结果,海洋测试总共确定 6 个发送端位置,接收端位置固定不变,收发端距离从 400 m 开始,每次发送端增加的距离在 200~300 m。传感器节点硬件设备放置在海上微型通信小浮标平台中,与浮标体相连的水下传感器负责采集海洋环境数据,浮标使用的是 MZI-113 型水密天线,该天线是一种高性能的全向天线,具有 2 dBi 性能增益,耐腐蚀性较好,适用于 433 MHz 海上无线传感器节点收发设备上。汇聚节点设备放置在岸边,采用四根天线分别进行接收,测试场景和设备连接如图 8 所示。射频单元 CC1101 的主要参数同样按照表 1 进行配置。

测试系统搭建完成后,首先进行开机预测试,对天线进行微调,使得信号质量最优,测试结果显示系统能够实现正常稳定的工作。然后开动渔船,通过渔船将浮标传感器节点搭载至预先确定地附近进行投放测试,每隔一段距离测试通信的质量并记录。在海上移动测试实验时,浮标会随着海浪运动处于动态变化之中。在距离较近阶段,岸基接收节点与海上移动平台存在直视路径,收

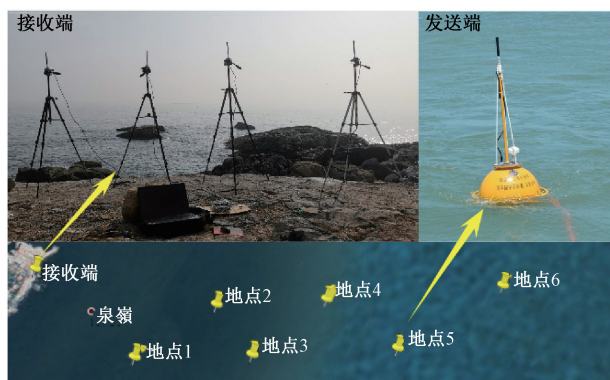


图8 海洋测试场景

Fig. 8 Marine test scenario

发端可视为视距传输。

2) 海洋环境 RS 码丢包恢复性能分析

海洋环境中,每个测试地点发送 2 805 个数据包,相当于发送端发送 11 个数据包组。图 9~11 所示分别表示在不同收发端距离下,统计在平均单路和四路合并情况下,接收端数据包组的丢包数、丢包间隔以及丢包率。其中,平均单路和四路合并总接收组数分别应为 44 和 11。

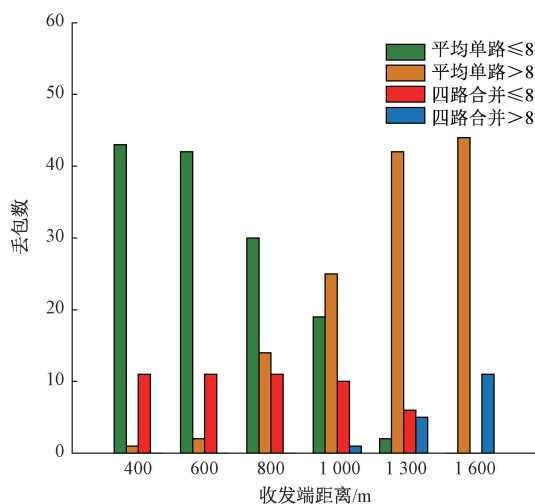


图9 海洋测试在不同收发端距离下丢包数

Fig. 9 The number of packets lost by the marine test under different distances between the transceiver

由结果可知,丢包特性同样从随机性丢包为主转变到以突发性丢包为主。当收发端距离在 400 m 范围内,可以实现数据包无差错恢复。在 400~800 m 距离内,平均单路和四路合并的丢包数量均以 ≤ 8 包为主,在此区间内接收端平均单路最大丢包率可达到 4.19%,丢包间隔为 36 包,采用 RS 码丢包恢复方法能够使平均单路丢包率降低至 3.01%。而四路合并最大丢包率为 0.499%,

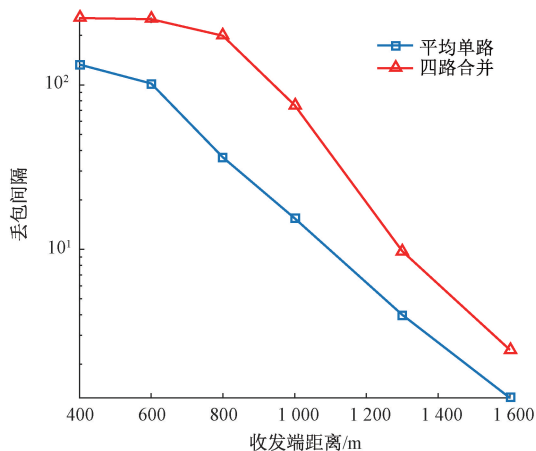


图10 海洋测试在不同收发端距离下丢包间隔

Fig. 10 The packet loss interval by the marine test under different distances between the transceiver

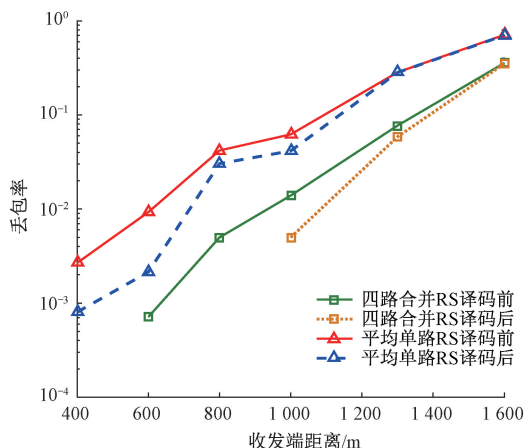


图11 海洋测试在不同收发端距离下丢包率

Fig. 11 The packet loss rate by the marine test under different distances between the transceiver

丢包间隔为 165 包,采用 RS 码纠错方法可以对丢包无差错恢复。在 1 000~1 600 m,当收发端距离为 1 600 m 时,接收端平均单路和四路合并的丢包率分别为 70.94% 和 35.62%,且数据包组的丢包数量均大于 8 包,丢包间隔均在 10 包以下,此时也很难通过 RS 码对丢包数据进行恢复。

3 结论

针对海洋无线传感器网络由于恶劣传输条件造成的丢包问题,本文提出并实现一种低复杂度基于 RS 码纠错机制的丢包恢复方法。在该方法中,传感器节点通过 RS 码编码使得数据包组的具有一定丢包恢复能力,汇聚节点根据接收的属于同一组编码的连续数据包,借助 RS 码

恢复出无线传输中随机或者突发丢失的数据包。为了验证提出的在单跳情况下 RS 码丢包恢复方法的性能,在陆地和海洋环境下分别开展实际测试。测试结果表明,本文提出的低复杂度基于 RS 码纠错机制的丢包恢复方法能在丢包率较低的情况下,有效准确恢复丢失的数据包,保证信息传输的完整性。而且 RS 码编码长度容易调整,编码并没有带来额外开销,使得该方法更适用于复杂度低的传感器节点。

参考文献

- [1] PEREZ C A, VALLES F S, SANCHEZ R T, et al. Design and deployment of a wireless sensor network for the mar menor coastal observation system [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42 (4): 966-976.
- [2] 张铮, 曹守启, 朱建平, 等. 面向实时监测的无线传感网低功耗通信策略 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 257-264.
ZHANG ZH, CAO SH Q, ZHU J P, et al. Low power communication scheme in wireless sensor network for real-time monitoring [J]. Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 257-264.
- [3] ZENG F G, LI W S, GUO X C. Design of marine environment monitoring system based on wireless sensor network [C]. 2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI), 2018: 506-509.
- [4] 方如举, 王建平, 孙伟. 智能配电网无线传感器通信网络的跨层协作控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 128-136.
FANG R J, WANG J P, SUN W. Cross layer cooperation control of wireless sensor communication network applied in smart distribution grid [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32 (2): 128-136.
- [5] XU G B, SHEN W M, WANG X B. Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: A survey [J]. Sensors, 2014, 14 (9): 16932-16954.
- [6] MAHMOOD M A, SEAH W K G, WELCH I. Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead [J]. Computer Networks, 2015, 79: 166-187.
- [7] 朱艺华, 徐骥, 田贤忠, 等. 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 [J]. 计算机学报, 2015, 38(10): 2106-2124.
ZHU Y H, XU J, TIAN X ZH, et al. Energy-efficient and low-delay reliable data gathering scheme applying simple reed-solomon code for wireless sensor network [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38 (10): 2106-2124.
- [8] ADITI G, SHWETA J, SUNIL J, et al. Real time analysis of MAC based and level based routing protocol for wireless sensor network [C]. 2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2018: 1199-1204.
- [9] WU C, JI Y, XU J, et al. Coded packets over lossy links: a redundancy-based mechanism for reliable and fast data collection in sensor networks [J]. Computer Networks, 2014, 70: 179-191.
- [10] DHOUBA E H, SABRINE K, KAMEL B, et al. Performance analysis of received signal strength and link quality in wireless sensor networks [C]. IEEE 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2018: 173-178.
- [11] 李敬兆, 杨大禹, 任萍. 基于 RSSI 组播环境下的中继网络编码协作传输策略研究 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(11): 1-5.
LI J ZH, YANG D Y, REN P. Research on collaborative transmission strategy of relay aided network coding based on RSSI multicast environment [J]. Electronic measurement Technology, 2018, 41(11): 1-5.
- [12] AL-AWAMI L, HASSANEIN H S. Distributed data storage systems for data survivability in wireless sensor networks using decentralized erasure codes [J]. Computer Networks, 2016, 97: 113-127.
- [13] KUMAR C P, SELVAKUMAR R. Efficient data reconstruction in sensor networks using optimal locally recoverable codes [C]. 2017 IEEE Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2017: 217-221.
- [14] SHEU T L, KUO Y H, CHOU Z T. A packet-interleaving scheme using RS code for burst errors in wireless sensor networks [J]. Wireless Sensor Network, 2015(7): 83-99.
- [15] YE R, BOUKERCHE A, WANG H J, et al. RECODAN: An efficient redundancy coding-based data transmission scheme for wireless sensor networks [J]. Elsevier-Computer Networks, 2016, 110: 351-363.
- [16] 周毅, 庞立会, 彭伟. 基于 CRS 编码的单向文件传输系统容错性研究 [J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(1): 27-33.
ZHOU Y, PANG L H, PENG W. Fault-tolerance of unidirectional file transmission system based on cauchy reed-solomon code [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015, 39(1): 27-33.

- [17] 沈记全, 谢果君, 杨焕焕. 基于纠删码技术的云存储数据块部署方案 [J]. 信息与控制, 2019, 48(2): 232-238, 256.
- SHEN J Q, XIE G J, YANG H H. Erasure code based data block deployment method in cloud storage [J]. Information and Control, 2019, 48(2): 232-238, 256.
- [18] LI Y T, CHEN P, YU Q Y, et al. Packet loss recovery algorithm based on row-column coding and RS coding [C]. Communications and Networking in China (CHINACOM), 8th International ICST Conference on IEEE, 2013: 877-881.
- [19] YU Q Y, MENG W X, LIN S. Packet loss recovery scheme with uniquely-decodable codes for streaming multimedia over p2p networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 142-154.
- [20] SROUJI M S, BONNY T, HENKEL J. RDTs: A reliable erasure-coding based data transfer scheme for wireless sensor networks [C]. 2011 IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems, 2011: 481-488.

作者简介



程群, 2017 年于河北师范大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail: chengqun@tju.edu.cn

Cheng Qun received his B. Sc. degree in 2017 from Hebei Normal University. Now he is a M. Sc. candidate at Tianjin University. His main research interest includes wireless sensor networks.



陈为刚 (通信作者), 2003 年于山东大学获得学士学位, 2008 年于清华大学获得博士学位, 现为天津大学副教授。2008 年 9 月~2009 年 9 月, 在法国信息处理与系统 (ETIS, UMR 8051) 实验室从事博士后研究。2014 年 9 月~2015 年 9 月, 在 UCLA 访问

学者。2012 年获得教育部新世纪优秀人才称号。主要研究方向为信息论与编码技术、海洋通信网络等。

E-mail: chenwg@tju.edu.cn

Chen Weigang (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2003 from Shandong University, Ph. D. degree in 2008 from Tsinghua University. Now he is an associate professor at Tianjin University. From September 2008 to September 2009, he was a Postdoctoral Research Fellow with ETIS (CNRS UMR 8051). From October 2014 to September 2015, he was a visiting research fellow with UCLA. In 2012, he received the program for new century excellent talents in University from the Ministry of Education. His main research interest includes information theory and coding and maritime communication networks.



巩峰, 2011 年于山东建筑大学获得学士学位, 2014 年于西安电子科技大学获得硕士学位, 现为青岛海洋科学与技术试点国家实验室中级工程师, 主要研究方向为海洋通信网络。

E-mail: fgong@qnlm.ac

Gong Feng received his B. Sc. degree in 2011 from Shandong Jianzhu University, M. Sc. degree in 2014 from Xidian University. Now he is an intermediate engineer at Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao). His main research interest include maritime communication networks.



王伟, 2014 年于山东科技大学获得学士学位, 2017 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 现为青岛海洋科学与技术试点国家实验室中级工程师, 主要研究方向为海洋通信网络。

E-mail: wwang@qnlm.ac

Wang Wei received his B. Sc. degree in 2014 from Shandong University of Science and Technology, M. Sc. degree in 2017 from Harbin Engineering University. Now he is an intermediate engineer at Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao). His main research interest include maritime communication networks.