

## 工业环境中 IEEE 802.15.4 链路突发性建模及重传机制优化<sup>\*</sup>

郭志强<sup>+</sup>, 王沁, 万亚东, 吴龙

(北京科技大学 计算机与通信工程学院, 北京 100083)

### Modeling of Burstiness for IEEE 802.15.4 Radio Link and Optimizing for Retransmission Mechanism in Industrial Environments

GUO Zhi-Qiang<sup>+</sup>, WANG Qin, WAN Ya-Dong, WU Long

(School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

+ Corresponding author: E-mail: guozhiqiang.ustb@gmail.com

Guo ZQ, Wang Q, Wan YD, Wu L. Modeling of burstiness for IEEE 802.15.4 radio link and optimizing for retransmission mechanism in industrial environments. *Journal of Software*, 2012, 23(Suppl. (1)): 77-86 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12009.htm>

**Abstract:** For the applications of wireless sensor networks in typical industrial environments, the wireless link quality of IEEE 802.15.4 has a certain degree of fluctuation and packets loss appear bursty. In this paper, a data-trace-driven modeling method and statistical inference is adopted for the statistical analysis of the loss interval in link-layer packet transmission traces. The study finds that the loss interval follows Pareto distribution and the distribution parameter reflects the distribution characteristics of loss interval under a different packet loss rate. Take the  $D_\alpha$ , namely correlation distance, which is the difference between the sample distribution parameter and that of the independent identical distribution under the same packet loss rate, as the indicator to characterize burstiness of packet loss. Through analysis and experiments, it is indicated that the retransmission independence distance (RID) in the link-layer has an approximate linear relation to the correlation distance. The study designs an optimal data retransmission mechanism using the indicator  $D_\alpha$  in single-hop links, which can improve data retransmission reliability. Finally, it is verified by experiments that the average of reliability improvement is 6.3% with the maximum 14.5%, which is relative to the fixed time-slot retransmission mechanism that does not consider the packets loss burstiness.

**Key words:** WSN; IEEE 802.15.4; link burstiness modeling; loss interval; retransmission reliability

**摘要:** 以典型工业环境中的无线传感器网络应用为测试背景,发现 IEEE 802.15.4 无线链路质量存在一定的波动跳变现象,并且数据包丢失存在突发性.采用数据轨迹驱动和统计推断的建模方法,对链路层数据传输轨迹中的丢包间隔进行统计并推断其分布特征,发现其符合 Pareto 分布,分布参数反映了不同丢包率下的丢包间隔分布情况.将分布参数与丢包率相同的独立同分布的分布参数之间的差值  $D_\alpha$ (相关性距离)作为描述丢包突发性的指标.分析和实验得出,  $D_\alpha$  与链路层的重传独立性距离(RID)有着近似的线性关系.在数据链路层利用  $D_\alpha$  来优化单跳链路的重传

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(61003251); 国家高技术研究发展计划(863)(2011AA040101); 国家教育部博士点基金(20100006110015)

收稿时间: 2012-05-05; 定稿时间: 2012-08-17

机制,可以提高数据重传的可靠性,通过实验验证,相对于不考虑链路丢包突发性的固定时隙重传机制,实验中所有链路的重传可靠性平均提高 6.3%,最高可提高 14.5%.

**关键词:** 无线传感器网络;IEEE 802.15.4;链路突发性建模;丢包间隔;重传可靠性

无线通信技术为现代工业的发展带来了诸多便利性,普遍用在工业无线网络搭建、设备状态监测、生产自动化等领域.集成了传感器、计算单元、无线收发器和数据存储等无线传感器网络节点,可以方便地部署到工厂的大部分区域,解除了传统工业中通信线缆的束缚和目标移动的限制,提高了现代工业的生产效率<sup>[1]</sup>.

IEEE 802.15.4 协议是现在普遍应用的无线通信标准<sup>[2]</sup>,规定了物理层和媒体访问控制层的特征,最高数据速率为 250Kbps,共有 16 个信道分布在 2.4GHz 频段上.该协议为低速率、低功耗和高可靠性的无线传感器网络(wireless sensor networks)应用提供了基础.然而对于 WSN 在工业领域的应用,无线通信链路的动态性和损耗是一个面临的主要问题,影响了链路层和路由层等上层协议的性能.考虑到工业网络可靠性要求较高,而且应用环境比较恶劣、复杂,因而应该对 IEEE 802.15.4 无线链路在工业环境下的特征进行充分的测试、分析和建模,以便设计出高可靠、低功耗和自适应的上层应用网络协议.

对于 IEEE 802.15.4 在工业 WSN 应用中的大部分无线链路,10%~50%的丢包率是很普遍的<sup>[3]</sup>,所以端到端的可靠性会受其影响,显著降低.数据包重传机制是提高传输可靠性的有效手段,一般设计在链路层和传输层的协议中.由于 WSN 节点的计算能力和存储资源有限,因此一般将重传机制放在链路层实现,以提高数据传输的能耗效率.例如:一般性考虑,30%的平均丢包率下,只进行 1 次数据包重传,理论上可以达到 91%的数据包接收率.上述结论显然没有考虑到链路丢包的分布特征和时间相关性,并且重传间隔时隙对数据包接收率的影响也没有体现.因此研究数据包丢失的分布特征,并分析重传间隔时间对可靠性的影响模型,对于设计高可靠性的工业 WSN 十分重要.

到目前为止,有部分文献对于不同环境下不同测试平台的无线链路质量进行了比较详细的测试和研究<sup>[4-6]</sup>,然而本文的侧重点是面向典型工业环境,对 IEEE 802.15.4 的多频道无线链路的丢包突发性进行统计建模,并分析链路突发性对于重传可靠性的定量影响模型.本文主要有两个贡献:第一是采用数据轨迹驱动的分析建模方法,对链路层数据包接收轨迹中的丢包间隔进行统计并推断其分布特征,证实其符合 Pareto 分布.第二是建立了链路突发性对于重传可靠性的定量影响模型,定义相关性距离  $D_\alpha$  作为刻画丢包突发性的指标,并利用  $D_\alpha$  来优化链路层的数据包重传协议,提高了重传可靠性.

本文第 1 节给出对于无线链路质量测试和分析建模的相关研究工作.第 2 节针对链路数据包丢失的突发性进行统计推断和模型建立.第 3 节设计基于相关性距离  $D_\alpha$  的链路层优化重传协议并给出实验结果和性能分析.第 4 节进行总结并提出下一步的研究方向.

## 1 相关研究工作

近 10 年来,很多研究机构对于不同环境下不同测试平台的无线链路质量进行了大量的测试和建模分析的研究工作.

文献[7]针对工厂环境,对 IEEE 802.15.4 无线链路在不同部署位置和时间区间进行了不同频道的链路质量测试,研究了无线链路的非对称性、时空特征,并进一步分析了 RSSI 和 LQI 对于描述链路质量的关系.为无线链路建模与分析进行了先期实验探索,奠定了一定的研究基础.Wireless HART<sup>[8]</sup>是一个应用在过程自动化领域的无线 Mesh 网络通信协议.为了达到 99.9%的可靠性,使用了跳频技术、链路监测和自动修复技术、路由冗余技术等.但是该协议的设计没有充分考虑到链路层数据丢失的时间相关性特点.

从无线链路质量建模分析的统计学角度出发,文献[9]通过设计实验,用 1 个发送节点和 10 个接收节点进行无线链路质量测试.统计了链路丢包的突发长度(burst size),并绘制了相对频率图,发现单个数据包丢失的情况占到了 72%,小于等于 3 个丢包突发长度的占到了 90%.由于低丢包突发性的统计比例占有绝对优势,所以对突发长度的统计不能有效地反映链路丢包的突发性特征.文献[10]提出 RNP(required number of packets)的统计指

标对链路相关性进行评估,其反映了一次成功数据包的传输所需的平均重传次数.链路的自相关性使 RNP 与数据包接收率 PRR 的反比关系不能成立,因此需要结合 PRR 和 RNP 来评估链路质量.文献[11]利用 3 个测试平台对 IEEE 802.15.4 无线链路进行测试,发现数据包接收率 PRR 在 10%~90%之间的链路存在突发性,利用条件概率统计了分别在连续收包和连续丢包条件下再次收到数据包的概率,并且定义了一个衡量链路突发性的指标参数 $\beta$ .然而统计的前提是链路的突发长度要在几十以上,这就造成了参数 $\beta$ 只能表征高突发性链路质量的问题.

无线链路突发性会很大程度上影响上层协议的性能.在数据链路层协议设计上,针对存在链路丢包突发性特征的链路,数据包连续重传的可靠性就会大为降低.IEEE 802.11<sup>[12]</sup>的 MAC 层协议的重传机制为当丢失应答包之后,经过指数型的随机退避时间后再发起数据重传.该重传间隔时间没有考虑到链路的时间相关性特征,是一种完全随机的重传机制.文献[13]提出了链路质量度量参数,以路径效率为主要指标分析了传统的数据链路层可靠传输模型,提出了一种以效率为中心的组确认模型,通过减少反向链路数据重传请求包的个数降低数据传输中的冗余信息.文献[13]的作者通过 NS-2 仿真工具对性能进行了测试,未在实际链路测试中进行模型验证.文献[11]中利用指标参数 $\beta$ 设计了一个链路层优化重传协议,指出当链路出现丢包之前要连续地发送数据包,当发生丢包现象后,停止一段时间的数据包发送,以此来打破丢包的相关性.然而本文通过在典型工厂环境下的实验数据统计分析得出,该相关性时间并非是常数,而是随链路突发性程度的不同而变化.

本文以文献[13]为研究工作的实验基础.在先前的研究工作中,我们设计了一套针对工厂环境下的无线链路质量测试验证平台,在北京科技大学轧铸实验工厂(简称校办工厂)和鞍山钢铁公司冷轧车间(简称鞍钢工厂)进行了链路质量的综合测试.上述环境中部署有大量的机械设备,电磁环境复杂,人员活动频繁,背景噪声和温湿度变化大,是一种典型的工业现场环境.从实验结果分析得出,对于某条确定的链路,不同频道上丢包率变化具有比较大的差异,即链路可靠性存在频道特征.对于某个频道而言,链路可靠性又具有时变特征,中间质量链路的丢包率随时间波动范围较大,链路可靠性在时间大窗口变化比较随机,但在小窗口呈现丢包突发现象.

上述工厂环境下链路的时变特征会影响上层协议设计和性能表现,解决该问题可以采用对链路特征进行离线分析建模或者对链路质量进行实时预测等方法,本文采用的是离线链路特征分析建模方法.

## 2 丢包突发性建模

### 2.1 丢包间隔

针对 IEEE 802.15.4 的链路质量测试,利用在两个工厂得到的充足的链路测试样本数据库,进行链路丢包特征的分析.在数据库中每一次实验都保存了探测数据包的接收信息,形成了一系列的数据包接收轨迹.该轨迹记录了数据包是否正确收到,以及收到时的 RSSI 和 LQI 等信息.从该轨迹中提取数据包是否收到的信息,这样就形成了一次实验的二进制离散序列  $\{v_i\}_{i=1}^N$ ,取值集合为  $V = \{0,1\}$ ,其中 0 表示数据传输失败,1 表示数据传输成功.

针对上述一次实验形成的二进制离散序列,首先定义实验中某时间段内链路平均丢包率 PLR(packet loss rate)为

$$PLR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (1)$$

其中, $N$ 为某时间段内的离散序列个数.

为了定量刻画数据包丢失的突发性特征,定义  $I_n$  为相邻两次数据传输失败的时间间隔,简称丢包间隔(loss interval),满足  $\{v_{m+n} = 0; v_m = 0; \forall k \in (m, m+1, \dots, m+n), v_k = 1\}$  且  $m \in [1, N-n]$ .

丢包间隔反映了无线链路丢包的突发性程度,平均丢包间隔小,则反映链路丢包突发性大.第 2.2 节通过对实验样本形成的二进制离散序列进行丢包间隔的相对频率分布进行统计,以发现其内在的统计规律.

### 2.2 $I_n$ 分布特征

针对校办工厂和鞍钢工厂的实验数据所形成的二进制离散序列,对其丢包间隔  $I_n$  进行相对频率的统计.为

了顾及到整个样本空间的多样性和完整性,对两种测试环境下不同类型的链路,不同丢包率的实验数据样本分别进行了统计,绘制了相对频率直方图.结果发现所有样本数据的  $I_n$  分布特征都具有一定的统计规律,图 1 是校办工厂测试环境下一条非直视链路在 PLR 为 20%和 40%下的丢包间隔分布直方图.

从图中可以看出,随着丢包间隔的增大,其所占比例呈现幂律式的降低,表现出长尾趋势.数据包丢包间隔小于 10 的构成了绝大部分比例(98%以上).同时可以看出,平均丢包率 PLR 越高,丢包间隔的相对分布越趋向于间隔小的部分,这说明平均丢包间隔随着 PLR 的增大而有缩小的趋势.

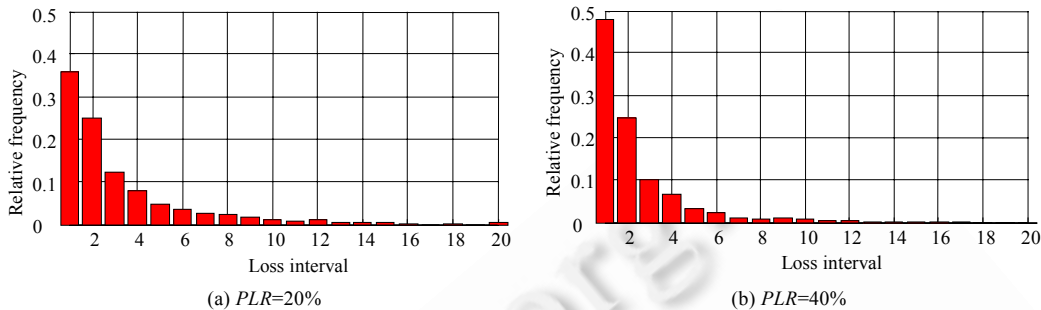


Fig.1 Frequency distribution histogram of loss interval

图1 丢包间隔分布直方图

### 2.3 统计推断

从两个工厂测试环境中大量不同样本集的统计分析中得出,丢包间隔  $I_n$  的分布可以近似满足幂律分布.Pareto 概率密度分布是幂律分布的一种形式<sup>[15]</sup>,其概率密度函数如下:

$$p(x) = \alpha \frac{x_m^\alpha}{x^{\alpha+1}}, \text{ 满足 } x \geq x_m \quad (2)$$

对于丢包间隔  $I_n$  的统计,这里的  $x_m = 1$ .当  $x_m = 1$  时,不同分布参数  $\alpha$  的 Pareto 分布概率密度曲线如图 2 所示.

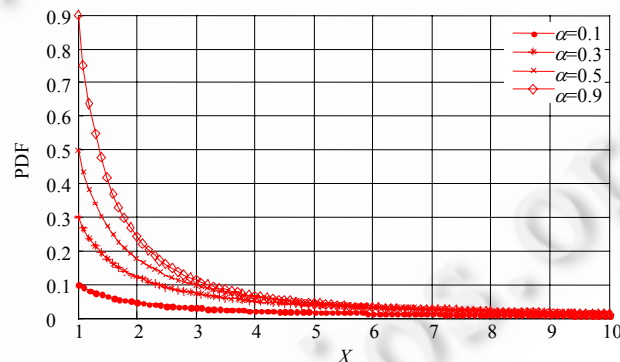


Fig.2 Probability density function of Pareto with different distribution parameter

图2 不同分布参数下的 Pareto 分布概率密度函数

下面用假设检验的方法来对丢包间隔是否符合 Pareto 分布做出统计推断.先假设二进制离散序列样本的丢包间隔符合 Pareto 分布函数,再用各个不同 PLR 下的实测样本对该统计量进行分布参数  $\alpha$  的估计,根据参数估计的显著性水平进行检验,以便做出样本是否符合 Pareto 分布的判断.

由两个测试环境下的不同实验数据样本对丢包间隔的分布参数  $\alpha$  以 95%的置信度进行置信区间的估计.图 3 是校办工厂环境下的某条链路丢包间隔的参数估计区间.从图中分析得出,分布参数  $\alpha$  的 95%置信度的置信区间在整个不同 PLR 下样本空间的平均值为 0.15.在丢包率为 5%时取得最大值 0.3.这表明,对于整个样本空间,丢包间隔的分布可以认为是符合 Pareto 分布函数的.对 PLR 低于 10%和高于 80%的样本数据,参数  $\alpha$  的置信区

间较大.而对于平均丢包率介于其中的样本数据,置信区间较小,这表明,中间质量无线链路的丢包特征更加符合 Pareto 分布,而这部分中间质量的链路,特别是 PLR 介于 10%和 50%的链路,正是工业环境下主要存在的链路质量形式,对于研究和优化数据重传协议具有重要意义.

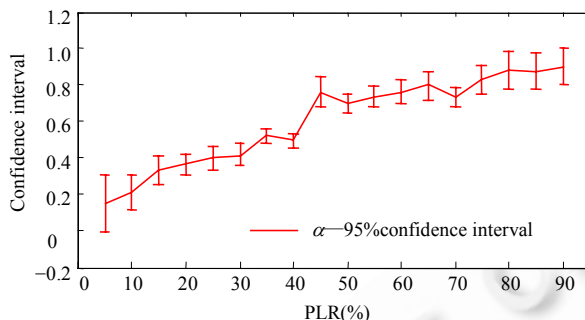


Fig.3 The confidence interval of the distribution parameter for links with different PLR

图3 链路在不同 PLR 下分布参数的置信区间

通过假设检验的方法,可以基本判定丢包间隔的分布符合 Pareto 分布.实际样本数据对于相应的 Pareto 分布函数的拟合误差反映了分布拟合的精确程度,可以用分布参数  $\alpha$  下的均方根(RMSE)来体现.

分布参数  $\alpha$  下的均方根,也称为回归系统的拟合标准差,统计公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

其中,  $n$  为一个样本集的容量,  $y_i$  是真实样本值,  $\hat{y}_i$  是推断估计值.

针对图 3 所示的校办工厂环境下的同一条链路丢包间隔的参数估计,图 4 是其参数估计的均方根统计图.从均方根的统计图可以看出,丢包间隔用 Pareto 分布函数去拟合时,对于中间质量链路(PLR=10%~80%)的拟合效果最好,RMSE 的均值为 0.031,高丢包率的次之,低丢包率的效果最差.当 PLR=5%时,RMSE 达到 0.085.这是因为对于低丢包率的无线链路,其链路质量非常好,很少出现丢包现象,链路处于连通的状态,而丢包间隔的统计对于该链路特征的体现略显不足.该类型的链路质量很好,不需要数据包的重传,所以不会影响下一节对于链路层重传机制优化的研究.

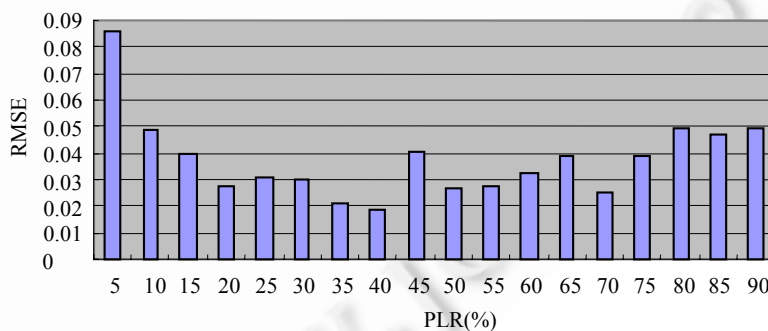


Fig.4 The root-mean-square histogram of parameter estimation

图4 参数估计的均方根统计图

### 3 重传机制优化

#### 3.1 相关性距离 $D_\alpha$

假设工厂环境下的 IEEE 802.15.4 链路丢包是符合独立同分布(I.I.D)特征的,那么重传一次的理论数据包

接收可靠性  $P_{r\_tot}$  可以表示成:

$$P_{r\_tot} = P_r(S_1) + P_r(S_2 \cdot E_1) = P_r(S_1) + P_r(S_2)P_r(E_1) = 1 - P_r(E_{IID})^2 \quad (4)$$

其中,  $S$  表示数据包传输成功,  $E$  表示数据包传输失败,  $E_{IID}$  表示符合 I.I.D 丢包特征的数据包传输失败. 根据概率统计中的大数定律得知:

$$\lim_{N_{sample} \rightarrow \infty} P_r(E_{IID})^2 = PLR_{sample} \quad (5)$$

其中,  $N_{sample}$  表示统计样本的数量,  $PLR_{sample}$  表示样本的平均丢包率. 因此容易得出下式:

$$\lim_{N_{sample} \rightarrow \infty} P_{r\_tot} = 1 - PLR_{sample}^2 \quad (6)$$

实际链路数据的样本统计中, 一条链路通常选取  $N_{sample}$  的数值为 10 000. 下面分别用符合 I.I.D 特征的仿真数据和实际链路数据进行数据包重传可靠性的实验对比分析.

用 Matlab 仿真工具生成某个任意 PLR 下符合 I.I.D 特征的链路丢包二进制离散序列, 利用该序列模拟链路层数据包的重传过程. 具体模拟传输过程如下: 从二进制离散序列的起始点开始模拟数据包的传输过程, 如果第 1 次传输的序列点为成功传输点, 则认为这次模拟数据包传输成功. 如果为失败传输点, 则间隔  $N$  个时隙后进行数据包的重传, 如果为成功传输点, 则认为此次重传成功, 否则认为数据包传输失败, 接着开始下一次新的数据包传输过程. 遍历二进制离散序列点, 以此来统计重传间隔时隙对于数据包接收可靠性的影响.

图 5 是 PLR 为 50% 的 I.I.D 特征的链路丢包序列仿真结果. 图中水平线上的点为利用公式(6)计算出的理论传输可靠性, 波动的点为不同重传间隔下的数据传输可靠性, 可以看出, 模拟仿真的重传可靠性围绕理论数值做上下小范围的波动, 说明对于符合 I.I.D 特征的链路丢包, 重传间隔时隙对于重传可靠性没有影响. 其他 PLR 下符合 I.I.D 特征的链路丢包二进制离散序列都表现出上述性质, 不再一一展现.

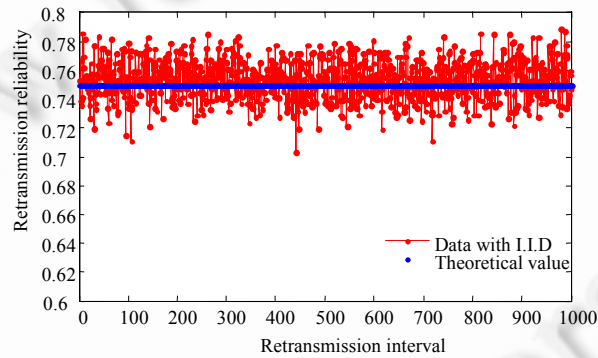


Fig.5 Link retransmission reliability of I.I.D packet loss characteristic

图5 I.I.D 丢包特征的链路重传可靠性

利用在校办工厂和鞍钢工厂测试的实际样本数据, 任意选取一条链路的某个 PLR 下的二进制离散序列, 采用数据驱动的模拟方式, 重现数据包重传过程, 以此来统计分析实际样本数据中重传间隔时隙对于重传可靠性的影响. 通过大量的实验数据模拟分析得出, 实际工厂环境下的链路数据与 I.I.D 特征的链路数据对于重传可靠性的影响完全不同, 并且表现出较为一致的特性. 实际链路数据表现出更强的丢失突发性, 重传间隔小的重传可靠性比理论数值要低.

图 6 为校办工厂环境下 PLR 为 50% 的某条链路的数据包重传可靠性随重传间隔的变化曲线, 从图中可以明确看出, 数据接收可靠性在重传间隔从 1~200 的区间里, 是以线性陡升趋向于相应 I.I.D 丢包特征的理论值. 之后随着重传间隔的增大, 重传可靠性在理论值上下做小幅度震荡.

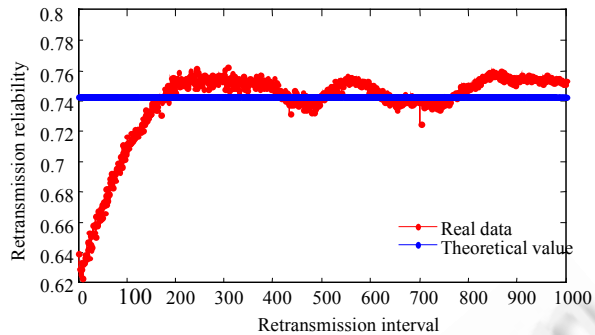


Fig.6 Link retransmission reliability of real links

图6 实际链路的重传可靠性

通过上面的对比实验得出,实际工厂环境下的链路特征对于重传可靠性的影响随重传间隔时间而变化.对于实际链路的丢包突发性对重传可靠性的影响,作如下的定义和分析.

**定义 1.** 把实验样本数据的重传可靠性曲线与理论可靠性曲线的第 1 个交点横坐标定义为重传独立性距离(retransmission independence distance,简称 RID).

RID 反映了重传间隔时隙对于数据重传可靠性的影响范围,超出 RID 的重传间隔时间对于数据重传可靠性的影响就消除了,表现出相应 I.I.D 特征的重传可靠性.

**推论 1.** I.I.D 丢包特征的 RID 为 0.

利用第 2 节建立的丢包突发性模型,进一步分析造成上述现象的原因.首先分析实际工厂环境下的链路数据与 I.I.D 特征的链路数据的丢包间隔的 Pareto 分布特征差别,正是这种差别造成了数据重传可靠性的不同.

**定义 2.** 把实验样本的 Pareto 分布参数与相同 PLR 下的 I.I.D 特征的分布参数之间的差值定义为相关性距离(correlation distance),记做  $D_\alpha$ ,如公式(7)所示:

$$D_\alpha = \alpha_{sample} - \alpha_{iid} \quad (7)$$

$D_\alpha$ 定量地反映了链路丢包的突发性程度.图 7 是工厂环境下图 6 中那条相应的数据链路和相应 I.I.D 特征链路的丢包间隔的 Pareto 分布对比情况.从图中可以看出,实际工厂数据的丢包间隔分布与 I.I.D 特征的有明显不同,其相关性距离  $D_\alpha=0.18$ .下一小节通过统计实验来分析  $D_\alpha$  与 RID 之间的关系.

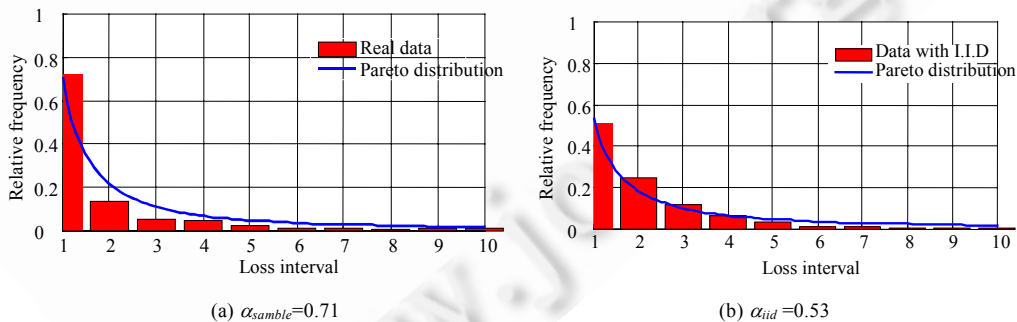


Fig.7 The Pareto distribution of experiment data and simulated data with I.I.D

图7 实验数据和 I.I.D 数据的 Pareto 分布

### 3.2 重传可靠性模型

通过对校办工厂和鞍钢工厂测试环境下的大量样本数据,以轨迹数据驱动方式来进行数据重传可靠性实验,发现实验样本的相关性距离  $D_\alpha$  的变化趋势与重传独立性距离 RID 的变化趋势相一致,即可以通过相关性距

用来刻画链路层数据的重传可靠性,并可以进一步预测合适的重传间隔时隙,这种关系称为重传可靠性模型,见公式(8).图 8是校办工厂环境下的某条链路在不同 PLR 下的相关性距离与重传独立性距离之间的变化趋势图.从图中可以看出两者具有近似的线性关系,即

$$RID / D_{\alpha} = C \quad (8)$$

通过一元线性回归方法可以得到该模型常量  $C$  的最优值, $C$  反映了这条链路所处环境对链路丢包特性造成的综合影响,与环境具有一定的相关性.

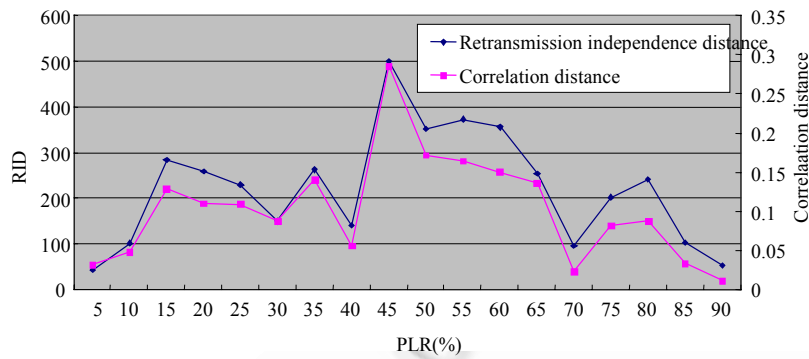


Fig.8 RID and correlation distance with different PLR

图8 不同 PLR 下的重传独立性距离与相关性距离

对于链路层数据丢包特征的刻画,单一的 PLR 无法反映丢包的时间相关性信息,然而辅以丢包间隔为统计对象的突发性模型,正好解决了刻画时间相关性的问题.以 Pareto 分布参数为基础定义的相关性距离  $D_{\alpha}$  恰好反映了丢包的时间相关性信息,刻画了链路丢包突发性,并且与重传独立性距离 RID 具有简单的线性关系.这为第 3.3 节研究链路层数据包的重传机制优化提供了依据.

### 3.3 独立性重传及验证

考虑到相关性距离  $D_{\alpha}$  可以反映重传独立性距离 RID 的变化趋势,基于  $D_{\alpha}$  设计了一个针对单跳链路的优化链路层数据重传机制.

发送节点实时地记录和评估数据包传输过程中的 PLR 变化,并统计数据包丢包间隔的分布情况.计算出当前 PLR 下的相关性距离  $D_{\alpha}$ ,依据离线模型统计分析出的常量  $C$ ,推断出重传独立性距离 RID.当数据包需要重传时,依据 RID 来分配重传间隔时隙,这样就避免了数据包丢失的突发性对于数据接收可靠性的影响,可以实现与 I.I.D 特征一样的重传可靠性,我们把基于 RID 的重传机制叫做“独立性重传机制”.

依据独立性重传机制,采用文献[14]中的链路质量测试平台,在工厂环境下设计的单跳链路的数据重传可靠性实验.为了对比验证独立性重传机制的可靠性,同时进行了固定时隙重传实验.

实验结果表明,相对于普通的固定时隙重传机制,独立性重传机制的可靠性在不同 PLR 下都有了不同程度的提高,其平均可靠性提高幅度如图 9 所示.中间链路质量的数据重传可靠性的提高幅度比高丢包率和低丢包率的要大,最高时可靠性提高幅度为 14.5%.对于 PLR 低于 10% 的无线链路,重传可靠性提高幅度在 2% 以下,这是因为其丢包较少,丢包特征更接近于 I.I.D 特征,所以独立性重传的性能提高得不明显.当然,对于高质量的链路,数据重传的必要性也就大幅降低了.对于 PLR 高于 50% 的无线链路,虽然其独立性重传的性能有所提高,但是针对这样的链路不应该考虑数据包的重传,而应该考虑另一种提高数据传输可靠性的方法,即自适应跳频,这是课题组下一步的研究方向.



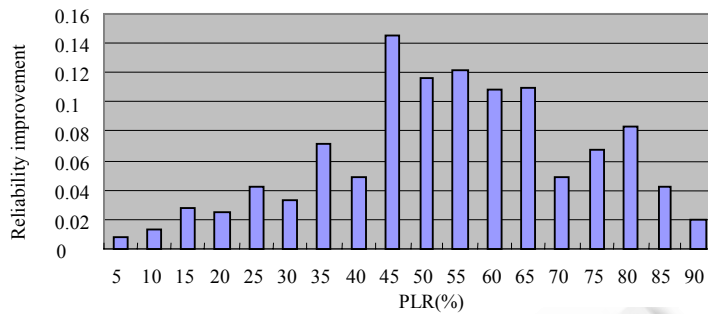


Fig.9 The average improvement of reliability for independence retransmission mechanism

图9 独立性重传机制的平均可靠性提高幅度

## 4 总 结

本文面向典型工业环境中的无线传感器网络应用,从 IEEE 802.15.4 无线链路质量测试实验的结果出发,采用数据轨迹驱动的方法对数据包丢失的突发性进行建模分析.针对轨迹中的丢包间隔进行统计并推断其符合 Pareto 分布.定义相关性距离  $D_c$  作为刻画丢包突发性的指标.实验分析得出,相关性距离与重传独立性距离有着近似的线性关系.利用相关性距离设计了一个优化链路层数据重传协议“独立性重传协议”,提高了单跳链路的重传可靠性.

本文的研究结论虽然是基于两个典型工厂环境下的实验数据而得出的,但其采用的建模分析和统计推断等方法可以适用于其他工业环境下的无线链路突发性建模,方法论具有一般性.

对于可靠性要求比较高的工业 WSN,数据包重传机制是一项提高可靠性的重要手段,合理地分配重传数据包的时隙,对于提高可靠性是十分重要的.下一步研究如何利用链路质量模型和评估策略来为网络部署前设计和部署后自适应性提供完整的解决方案.在某些工业应用场景下,对数据传输的实时性也有要求,那么在考虑重传可靠性的同时,需要对数据传输的时延约束进行建模分析,以寻求满足应用要求的最优解.

**致谢** 本文中大量链路测试样本数据都来自于北京科技大学轧铸工厂和鞍山钢铁公司冷轧 4 号线车间,在此我们向相关负责人和实验中给予协作的工作人员表示感谢.同时感谢评阅本文的专家和学者为本文提出了中肯的修改意见.

## References:

- [1] Willig A, Matheus K, Wolisz A. Wireless technology in industrial networks. Proc. of the IEEE, 2005,93(6):1130–1151. [doi: 10.1109/JPROC.2005.849717]
- [2] IEEE Standard for Information Technology—Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2006. 1–320. [doi: 10.1109/IEEESTD.2006.232110]
- [3] Gungor VC, Hancke GP. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2009,56(10):4258–4265. [doi: 10.1109/TIE.2009.2015754]
- [4] Guzelarslan B, Struck S, Dippold M. A hidden Markov based end-to-end architecture to measure, model, emulate, and estimate wireless access network characteristics. In: Proc. of the Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2011. 1–7.
- [5] Munir S, Lin S, Hoque E. Addressing burstiness for reliable communication and latency bound generation in wireless sensor networks. In: Proc. of the 9th ACM/IEEE Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks. Stockholm: ACM, 2010. 303–314. [doi: 10.1145/1791212.1791248]
- [6] Ben BN. A testbed for the evaluation of link quality estimators in wireless sensor networks. In: Proc. of the 2010 IEEE/ACS Int'l Conf. on Computer Systems and Applications (AICCSA). 2010. 1–8. [doi: 10.1109/AICCSA.2010.5587002]

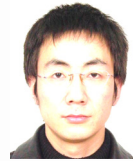
- [7] Lei T, Kuang-Ching W, Yong H. Channel characterization and link quality assessment of IEEE 802.15.4—Compliant radio for factory environments. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2007,3(2):99–110. [doi: 10.1109/TII.2007.898414]
- [8] Wireless HART Overview. <http://www.hartcomm.org>
- [9] Willig A, Mitschke R. Results of bit error measurements with sensor nodes and casuistic consequences for design of energy-efficient error control schemes. *Wireless Sensor Networks*, 2006. 310–325. [doi: 10.1007/11669463\_23]
- [10] Cerpa A, Wong JL, Potkonjak M. Temporal properties of low power wireless links: Modeling and implications on multi-hop routing. In: *Proc. of the 6th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. Urbana-Champaign: ACM, 2005. 414–425. [doi: 10.1145/1062689.1062741]
- [11] Srinivasan K, Kazandjieva MA, Agarwal S. The beta-factor: Measuring wireless link burstiness. In: *Proc. of the 6th ACM Conf. on Embedded Network Sensor Systems*. Raleigh: ACM, 2008. 29–42. [doi: 10.1145/1460412.1460416]
- [12] IEEE Standard for Information Technology—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 2007. 1–1076. [doi: 10.1109/IEEESTD.2007.373646]
- [13] Zhang XY, Zhao H, Sun PG. Reliable transfer model for wireless sensor networks based on data link layer retransmission. *Journal of System Simulation*, 2007,19(22):5325–5335 (in Chinese with English abstract).
- [14] Wang Q, Wan Y D, Li L. Multi-Channel reliability modeling and analysis for IEEE 802.15.4 in industrial environment. *Journal of Computer Research and Development*, 2009,46(12):1971–1984 (in Chinese with English abstract).
- [15] Newman M. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary Physics*, 2005,46(5):323–351. [doi: 10.1016/j.cities.2012.03.001]

附中文参考文献:

- [13] 张希元,赵海,孙佩刚.基于链路层重传的传感器网络可靠传输模型.系统仿真学报,2007,19(22):5325–5335.
- [14] 王沁,万亚东,李磊.工业环境 IEEE 802.15.4 链路的多频道可靠性分析与建模.计算机研究与发展,2009,46(12):1971–1984.



郭志强(1984—),男,山东潍坊人,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为高可靠性工业无线传感器网络,嵌入式系统,智能仪器.



万亚东(1982—),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究领域为工业无线传感器网络.



王沁(1961—),女,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,计算机系统结构.



吴龙(1990—),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络协议仿真.