



面向铁路环境监测的无线传感器网络通信性能分析

陈瑞凤¹, 倪明², 徐春婕¹, 胡昊¹

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所, 北京 100081;

2. 中国铁路哈尔滨局集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 部署在铁路沿线的无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)用于铁路运行环境监测中, 为延长 WSN 的寿命周期, 有必要引入节点休眠机制。因此, 首先采用随机过程理论建立了基于节点休眠机制的铁路沿线 WSN 通信性能分析模型, 揭示了铁路沿线不同系统因素对 WSN 接收性能的影响机理, 并得到了最优工作节点比例与其他系统参数之间的关系, 搭建仿真平台分别模拟铁路沿线较为安全区域和灾害高发区域的 WSN 接收性能, 最后通过实际案例论证了基于休眠机制的部署方案, 可以为铁路沿线 WSN 的实际部署提供理论指导。

关键词: 铁路环境监测; 无线传感器网络; 通信性能; 节点休眠机制; 最优工作节点比例

中图分类号: U268.6

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019091

Communication performance analysis of wireless sensor network for railway environmental monitoring

CHEN Ruifeng¹, NI Ming², XU Chunjie¹, HU Hao¹

1. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China

2. China Railway Harbin Group Co., Ltd., Harbin 150001, China

Abstract: Wireless sensor network (WSN) deployed along the railway can be commonly applied to environmental monitoring. In order to lengthen the lifetime of WSN, it is essential to introduce the node sleeping mechanism. Therefore, firstly the stochastic process theory was adopted and an analytical framework was proposed to study the communication performance of WSN in railway scenarios based on the node sleeping mechanism. Furthermore, the impacts of different system factors on the reception performance of WSN were analyzed under railway scenarios, and then the relation between the optimal ratio of active nodes and other system factors could be obtained. A simulation platform was established to verify the reception performance of WSN in safety areas and hazards-prone sections respectively. Finally, practical case was presented to verify the deployment scheme based on node sleeping mechanism. The analytical results could provide the guidelines for practical deployment of WSN under railway scenarios.

Key words: railway environmental monitoring, wireless sensor network, communication performance, node dormancy mechanism, optimal ratio of active node

收稿日期: 2019-03-05; 修回日期: 2019-05-06

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题 (No.2017X006-C, No.2017X001-H); 中国工程院咨询研究项目 (No.2018-ZD-05)

Foundation Items: China Railway Corporation Science and Technology Research and Development Project (No.2017X006-C, No.2017X001-H), China Engineering Academy Consulting Research Project (No.2018-ZD-05)

1 引言

行车安全是铁路运输的基础问题,监测铁路沿线环境对保障列车行车安全具有重要意义。若列车运行前方突发泥石流、山体滑坡、塌方等自然灾害,有可能迅速摧毁铁路基础设施,严重影响铁路运输安全。在自然环境中由于铁路沿线周边不可预知的山体滑坡事故,铁路线路会受到极大程度的破坏^[1],如图 1 所示。因此,建立实时可靠的铁路环境监测体系,提升铁路环境监测的智能化,已成为保障我国铁路运输安全的重要问题。



图 1 自然环境下山体滑坡对铁路线路造成严重破坏的示意图

既有的铁路环境监测系统多采用有线传输^[2],监控单元通过光纤线路将环境信息传输到监测中心。由于我国铁路沿线环境的复杂性,有线传输线路布设、装置安装维护等问题都易受到地理环境的限制,这为铁路沿线环境监测系统的安装和维护带来巨大困难。考虑到无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)在环境监控、智能交通等领域的广泛应用,并且具有免布线、成本低、对环境适应能力强等特点^[3],因此,非常有必要将 WSN 应用到铁路沿线环境监测中,为环境监测及灾害预警提供实时可靠的监测信息^[4]。

面向铁路环境监测的 WSN 是由部署在铁路沿线的若干传感器节点组成的分布式无线通信网络,具有快速部署、迅速组网、多跳通信等特点。基于 WSN 的铁路环境监测系统架构如图 2 所示,

多种传感器可以实时采集铁路沿线的环境数据,并无线传输到汇聚处理层,进一步传输到车载监测系统和地面监控中心,实时有效地监测铁路沿线的自然灾害信息。在铁路复杂环境下,WSN 传输的信息涵盖优先级较高的自然灾害预警消息,为保障行车安全,必须保证 WSN 预警信息的可靠、实时传输。因此,对 WSN 通信性能的分析 and 评估,可以反映预警消息传输的可靠性与稳定性,从而为 WSN 实际部署和通信协议设计提供理论指导,具有重要的研究意义。

在铁路沿线环境下,WSN 性能易受节点分布、电波传播等因素的影响。目前国内外相关研究针对 WSN 的节点分布假设主要分为两类:均匀分布和随机分布。均匀分布这一假设较为理想,但在实际 WSN 应用中,节点部署通常难以满足均匀分布^[5]要求,在铁路复杂环境更是如此。目前针对 WSN 的相关研究多采用随机分布模型^[6-7],考虑到铁路复杂环境中节点均匀部署的困难较大,本文也采用随机分布来描述铁路环境 WSN 的节点分布特性,为未来铁路环境 WSN 的实际工程部署提供理论指导和参考。

电波传播环境对 WSN 通信性能具有重要的影响。参考文献[8]和参考文献[9]基于大量铁路现场测试,得到了当铁路复杂环境下多径信号分布密集时,信道呈现 Rayleigh(瑞利)衰落特征。铁路复杂环境存在着大量反、散射多径分量, Rayleigh 衰落信道模型可用于描述铁路环境无线信道的小尺度衰落特性。因此,本文也采用 Rayleigh 模型描述铁路复杂环境下的无线信道衰落特性,为开展 WSN 通信性能分析奠定基础。

此外,节点工作状态对铁路通信系统性能也具有重要的影响。为提高 WSN 的寿命周期与能耗有效性,有必要引入节点休眠机制^[10],这意味着一部分节点在空闲时处于休眠状态。当特定事件发生时,休眠节点将被唤醒,从而进入工作状态。WSN 中的工作节点比例越高,网络通信性能更

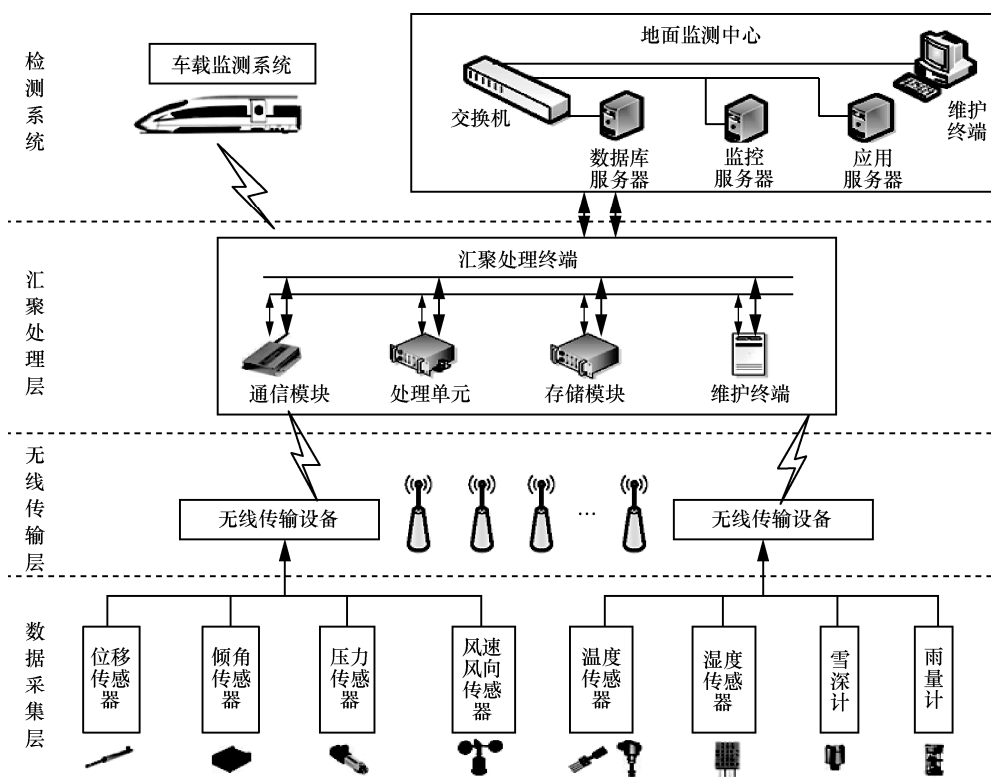


图2 基于 WSN 的铁路环境监测系统架构示意图

佳,但是当网络中存在大量工作节点时,如果其中一部分工作节点同时进行广播数据传输,它们可能给接收端造成干扰,反而降低了系统的接收性能。上述两种效应的存在增加了铁路沿线 WSN 通信性能研究的挑战。因此,本文将建立基于节点休眠机制的铁路 WSN 通信性能分析模型,研究工作节点比例对铁路 WSN 接收性能的影响机理,分别模拟铁路沿线较为安全区域与事故高发区域的 WSN 接收性能,并通过案例论证铁路 WSN 的部署方案,为铁路沿线 WSN 的实际部署提供理论指导。

2 系统模型

2.1 铁路沿线 WSN 模型

铁路沿线 WSN 节点可以实时感知和采集环境信息,并通过无线通信的方式,将采集到的环境信息通过多跳通信方式传输到汇聚节点,再由汇聚节点进一步传输到车载监测系统和地面监控

中心,如图3所示。沿线靠近轨边机房的 WSN 节点采用有线供电方式,其他节点采用太阳能供电。

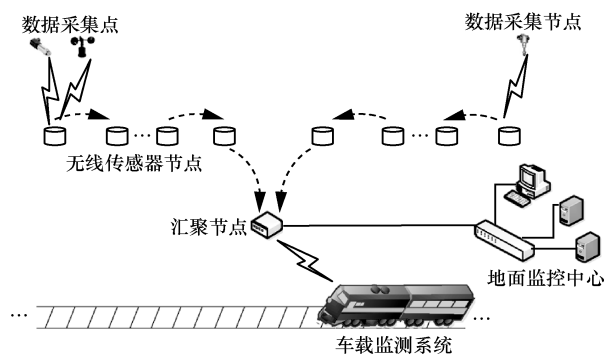


图3 铁路沿线 WSN 传输示意图

在某一观测时刻,任意一个无线传输节点都会以一定的概率处于休眠模式,以减小功耗、提升使用寿命,因此这部分节点定义为“休眠节点”;另一部分处于工作状态的节点称为“工作节点”,若一部分工作节点同时进行广播数据传输,则它们可能对接收端引入干扰。因此,这部分工作节点成为干扰源,在铁路 WSN 性能分析中需要重点考虑。

在铁路沿线场景下, WSN 节点状态分布的示意图如图 4 所示。其中, 深色节点表示休眠节点, 浅色节点代表工作节点, 带有天线的浅色节点则表示在观测时刻进行数据传输的铁路沿线工作节点 (除发射端和接收端外, 其余带有天线的浅色节点表示干扰源)。在观测时刻, 发射端和接收端之间正在进行数据传输, 而位于接收端附近的其他若干工作节点也同时进行消息的传输, 它们可能对接收端造成较强的干扰, 因此将这部分工作节点视为干扰源。本文将重点研究这些干扰源对铁路 WSN 通信系统性能的影响。

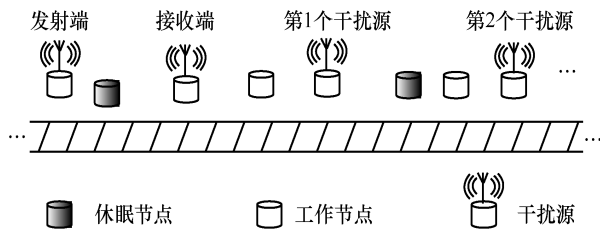


图4 铁路沿线 WSN 节点状态分布示意图

首先假设位于铁路沿线的 WSN 服从随机分布, 本文以强度为 λ 的 Poisson (泊松) 过程为例, 则沿线的 WSN 节点服从一维 Poisson 分布。当发生山体滑坡等自然灾害时, WSN 节点可能发生位移或者损坏, 网络自动重新配置, 同时更新节点分布的强度参数。在观测时刻, 网络中的任意一个 WSN 节点都以特定概率 p_a 处于工作状态, 则有 $1-p_a$ 的概率处于休眠状态, 则工作节点比例可以记作 p_a 。令 p_t 表示任意一个节点在某一时刻进行数据传输的平均概率。在观测时刻同时进行通信的一部分工作节点将作为主要干扰源, 根据随机过程理论, 干扰源数目 N_1 服从参数为 $\bar{\lambda}=\lambda p_t p_a$ 的 Poisson 分布, 其概率质量函数可以表示为:

$$\Pr\{N_1 = K\} = \frac{\bar{\lambda}^K}{K!} e^{-\bar{\lambda}} = \frac{(\lambda p_t p_a)^K}{K!} \exp(-\lambda p_t p_a) \quad (1)$$

其中, $\exp(\cdot)$ 表示负指数函数。

假设在铁路沿线的观测区域内存在 K 个独立

干扰源, 分别在接收端产生的干扰信号功率为

$\{I_j\}_{j=1}^K$, 即 $\{I_1, I_2, \dots, I_K\}$, 那么总干扰功率 I 为:

$$I = \sum_{j=1}^K I_j \quad (2)$$

2.2 无线信道衰落模型

本文采用 Rayleigh 分布作为铁路沿线 WSN 的衰落信道模型, 将重点研究基于 Rayleigh 信道模型的 WSN 通信性能, 这一假设符合铁路构建安全网络系统的需求。在 Rayleigh 信道下, 接收到的主信号包络 S 的概率密度函数可以表示为:

$$f_s(x) = \frac{x}{\omega_s} \exp\left(-\frac{x^2}{2\omega_s}\right), \quad x \geq 0 \quad (3)$$

其中, ω_s 表示主信号的平均接收功率。

进而可以得到主信号功率 P 服从指数分布, 可以表示为:

$$f_P(x) = \frac{1}{2\omega_s} \exp\left(-\frac{x}{2\omega_s}\right), \quad x \geq 0 \quad (4)$$

那么 P 的互补累积分布函数表示为:

$$\Pr\{P \geq t\} = \int_t^\infty f_P(x) dx = \exp\left(-\frac{t}{2\omega_s}\right) \quad (5)$$

在 Rayleigh 信道下, 当接收到 K 个独立同分布的干扰信号时, 对于任意第 j 个干扰信号, 其中 $j=1, 2, \dots, K$, 其功率 I_j 都服从参数为 ω 的指数分布。根据指数分布与 Gamma 分布的特性, 则总干扰功率 I 服从参数为 K 与 ω 的 Gamma 分布, 其概率密度函数可以表示为:

$$f_i(y) = \frac{1}{\Gamma(K)} \left(\frac{1}{2\omega}\right)^K y^{K-1} \exp\left(-\frac{y}{2\omega}\right), \quad y \geq 0 \quad (6)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数, 具体定义为:

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} s^{x-1} e^{-s} ds \quad (7)$$

当 K 是整数时, Gamma 函数可以计算为:

$$\Gamma(K) = (K-1)! \quad (8)$$



3 铁路沿线 WSN 性能研究

本文选取信干噪比 γ 作为判决接收端是否成功接收信息的度量, 假设铁路场景下无线信道的噪声功率为 N_0 , 则 γ 为:

$$\gamma = \frac{P}{I + N_0} \quad (9)$$

假设信干噪比的接收阈值为 θ , 本文定义铁路沿线 WSN 的成功接收概率为接收端所接收到的信干噪比 γ 不小于接收阈值 θ 的概率。根据全概率公式, 成功接收概率可以计算为当铁路 WSN 中存在 K 个干扰源的条件接收概率之和, 并对 K 的所有可能取值进行遍历, 可以表示为:

$$\begin{aligned} P_c &= \Pr\{\gamma \geq \theta\} = \Pr\left\{\frac{P}{\sum_{j=1}^K I_j + N_0} \geq \theta\right\} = \\ &\Pr\left\{\frac{P}{I + N_0} \geq \theta\right\} = \\ &\sum_{K=1}^{\infty} \Pr\left\{\frac{P}{I + N_0} \geq \theta \mid N_I = K\right\} \Pr\{N_I = K\} \end{aligned} \quad (10)$$

通过观察式 (10), 可以推导出当铁路 WSN 中存在 K 个独立同分布的干扰源时, 接收端依然能成功接收信息的条件接收概率 $\Pr\{\gamma \geq \theta \mid N_I = K\}$, 可以计算为:

$$\begin{aligned} &\Pr\{\gamma \geq \theta \mid N_I = K\} = \\ &\Pr\{P \geq \theta(I + N_0) \mid N_I = K\} = \\ &\int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{\theta(y + N_0)}{2\omega_s}\right] f_I(y) dy = \\ &\frac{1}{\Gamma(K)} \left(\frac{1}{2\omega}\right)^K \exp\left(-\frac{\theta N_0}{2\omega_s}\right) \int_0^{\infty} y^{K-1} \cdot \\ &\exp\left[-\left(\frac{1}{2\omega} + \frac{\theta}{2\omega_s}\right)y\right] dy \end{aligned} \quad (11)$$

基于 Gamma 函数性质, 式 (11) 的积分部分可以计算为:

$$\begin{aligned} &\int_0^{\infty} y^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{1}{2\omega} + \frac{\theta}{2\omega_s}\right)y\right] dy = \\ &\Gamma(K) \left(\frac{1}{2\omega} + \frac{\theta}{2\omega_s}\right)^{-K} \end{aligned} \quad (12)$$

进而得到条件接收概率的闭合表达式为:

$$\Pr\{\gamma \geq \theta \mid N_I = K\} = \exp\left(-\frac{\theta N_0}{2\omega_s}\right) \left(\frac{\omega_s}{\omega_s + \theta\omega}\right)^K \quad (13)$$

将式 (13) 与式 (1) 代入式 (10) 中, 便可求出铁路 WSN 成功接收概率的闭合表达式为:

$$\begin{aligned} P_c &= \sum_{K=1}^{\infty} \frac{(\lambda p_t p_a)^K}{K!} \left(\frac{\omega_s}{\omega_s + \theta\omega}\right)^K \exp\left[-\left(\lambda p_t p_a + \frac{\theta N_0}{2\omega_s}\right)\right] \\ &= \left[\exp\left(\frac{\lambda p_t p_a \omega_s}{\omega_s + \theta\omega}\right) - 1\right] \times \exp\left[-\left(\lambda p_t p_a + \frac{\theta N_0}{2\omega_s}\right)\right] \end{aligned} \quad (14)$$

基于最优化理论, 根据工作节点比例与成功接收概率之间的数值关系, 可以得到使得铁路沿线 WSN 接收性能达到最佳的最优工作节点比例为:

$$p_a^* = \frac{1}{\lambda p_t} \left(1 + \frac{\theta}{\varpi}\right) \ln\left(1 + \frac{\varpi}{\theta}\right) \quad (15)$$

其中, $\varpi = \frac{\omega_s}{\omega}$ 表示平均信干比 $\overline{\text{SIR}}$ 。

值得注意的是, 当 $\overline{\text{SIR}}$ 较小时, 即 $\varpi \rightarrow 0$, 根据对数函数的极限性质, 可以得到:

$$\ln\left(\frac{\theta}{\varpi} + 1\right) \approx \frac{\theta}{\varpi} \quad (16)$$

进而可以推导出最优工作节点比例 p_a^* 近似表示为:

$$p_a^* \approx \frac{1}{\lambda p_t}, \quad \varpi \rightarrow 0 \quad (17)$$

当铁路沿线无线传感器节点数目的分布参数 λ 和平均传输概率 p_t 增大时, 最优工作节点比例 p_a^* 将降低, 特别是在平均信干比 ϖ 较小的情况下, 这一变化趋势更加显著。这表明当铁路沿线部署了过多 WSN 节点时, 为了降低 WSN 自干扰对性能的不利影响, 应该适当增加休眠节点的比

例。因此,在铁路沿线 WSN 实际建设中,不仅需要根据环境潜在灾害设定无线传感器节点的布设密度,同样也需要根据节点密度优化节点休眠机制,最大化网络通信性能,保障铁路运输安全。

4 铁路沿线 WSN 性能仿真分析

本文采用 MATLAB 软件搭建了基于 Rayleigh 衰落信道模型的仿真平台,分别模拟了铁路沿线较为安全区域与事故易发区域的 WSN 通信性能,其中参照铁路通信的实际情况,各仿真参数设置为 $\lambda=50, 70, 110, 150$, $\omega_s=1$, $\omega=0.01, 0.04$, $p_t=0.05$, $N_0=0.01$, $\theta=3\text{ dB}$ 。为减小仿真过程中由于样本生成的随机性导致的误差,本文针对每组系统参数的组合情况,都将仿真次数设置为 10^4 次。

铁路沿线根据环境结构的差异,可以分为较为安全区域和灾害易发区域,其中安全区域主要是地势较为平缓的地带,而灾害高发区主要集中在山区等大量存在泥石流和山体滑坡的区域。从实际布网效率出发,这两类环境中 WSN 监测节点部署的密度各不相同。

4.1 铁路沿线较安全区域的 WSN 性能

本文首先针对铁路沿线环境较为安全的区域开展仿真,如图 5 所示。根据铁路无线通信的具体情况,在铁路沿线较为安全的区域内只需部署适量的 WSN 节点即可实现区域内的环境监测,因此在较安全区域内的 WSN 分布参数较小,可设定为 $\lambda=50$, $\omega_s=1$ 。从图 5 中可以看出, P_c 随着 p_a 的不断增大而增加, p_a 不断增大,意味着网络中的休眠节点越少。此外,当网络中存在更强的干扰信号时,例如当 $\omega=0.04$ 时,系统接收性能将受到影响而明显下降,这表明了较强的干扰信号对系统接收性能具有显著的影响,因而设计合理的通信协议以及干扰消除算法是十分必要的。

4.2 铁路沿线灾害易发区域的 WSN 性能

针对铁路沿线灾害高发区域开展了性能仿真,如图 6 所示,比较了当 $\omega=0.04$ 时, P_c 随 λ 的

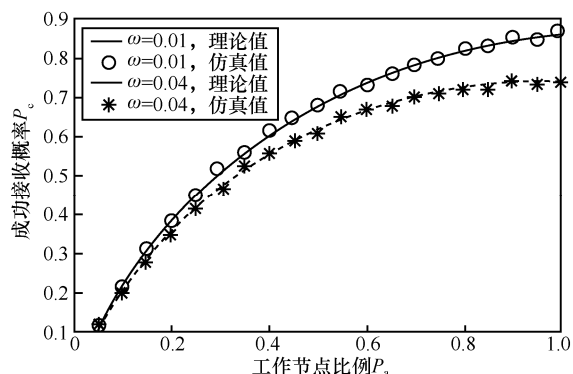


图5 铁路沿线较安全区域的 WSN 成功接收概率随干扰功率的变化趋势

变化趋势。在铁路沿线灾害高发区域,需要部署大量的 WSN 节点才能实现区域内的环境监测,则 λ 较大。在最开始的一段区域内,当 p_a 不断增大时, P_c 也在提升,但当 p_a 达到最优值 p_a^* 后,由于铁路 WSN 中存在大量的干扰信号,导致系统接收性能反而下降。因此,在铁路沿线进行 WSN 实际部署时,得到最优工作节点比例对提高 WSN 通信系统性能具有重要意义。

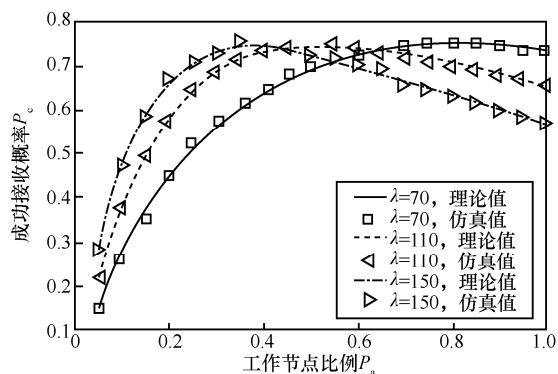


图6 铁路沿线灾害易发区域 WSN 成功接收概率随节点分布参数的变化

4.3 铁路沿线 WSN 的最优工作节点比例

在铁路沿线 WSN 平均信干比 ω 已知的情况(当 $\omega_s=1$, $\omega=0.04$ 时)下,最优工作节点比例 p_a^* 随着节点数目分布参数 λ 和平均传输概率 p_t 等系统参数的变化趋势如图 7 所示。本文所得到的 p_a^* 的理论近似值与实际值基本吻合。 p_a^* 与 λ 和 p_t 的乘积成反比关系,当 λ 和 p_t 不断增大时, p_a^* 将逐渐减小。因此,根据确知的铁路沿线 WSN 系统参



数,可以得到 p_a^* ,从而为铁路 WSN 节点休眠机制的参数设置提供理论依据。

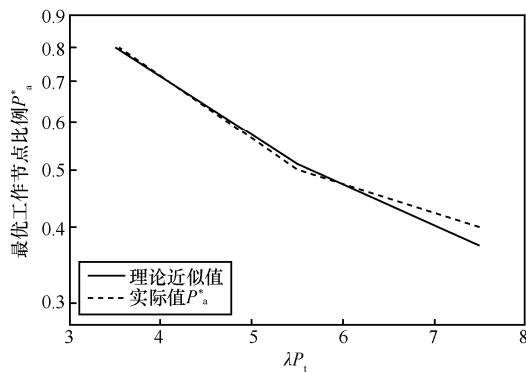


图7 铁路沿线 WSN 的最优工作节点比例 p_a^* 随着系统参数的变化趋势

5 铁路沿线 WSN 部署方案

本文将通过铁路 WSN 部署案例论证基于休眠机制的网络性能,以更加全面地为铁路环境 WSN 的实施部署提供理论指导和参考。当前方突发自然灾害时,高铁列车制动距离一般是 6 km,若再为司机预留一定的反应时间,假设反应距离

为 1 km 时,则铁路沿线的 WSN 需要将 7 km 以外的自然灾害报警信息实时传输到高铁列车上。以高铁线路中某条长为 7 km 的区域为例,本文将给出铁路沿线 WSN 的部署方案。

在高铁线路中某条长为 7 km 的区域内,传感器节点部署 70 个,服从参数 $\lambda=70$ 的 Poisson 随机分布。如图 8(a)所示,若不采用休眠机制,则所有节点都处于工作状态。而当加入节点休眠机制后, $p_a^* \approx 0.7943$,如图 8(b)所示,则在同一时刻需要其中 55 个节点作为工作节点,则最优工作节点比例为 $\frac{11}{14}$ 。

针对上述铁路沿线 WSN 的实际部署方案,本文以某段长为 7 km 的高铁线路内部署 70 个节点为例,对比基于休眠机制和未考虑休眠机制的两种部署方案,见表 1。考虑休眠机制后,网络能耗较低,节点寿命较长。

6 结束语

本文采用 Rayleigh 信道模型,建立了一种基于节点休眠机制的铁路 WSN 通信系统性能分析

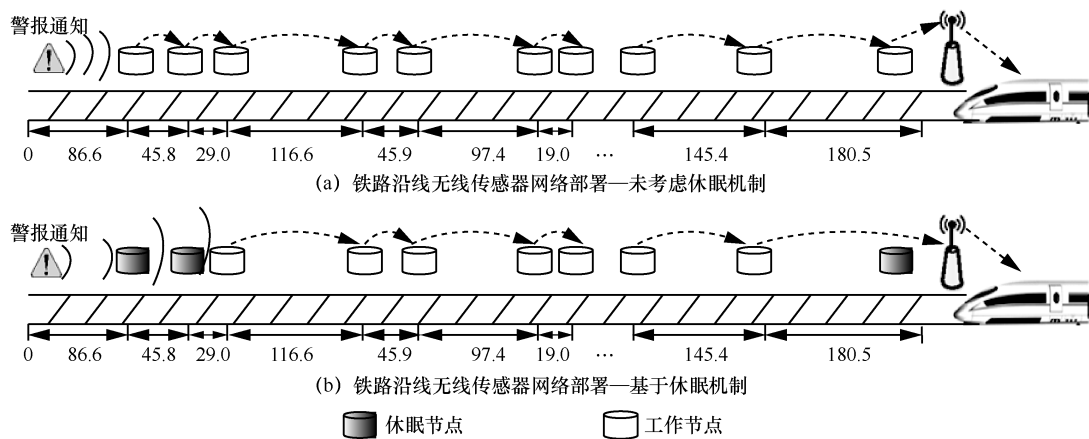


图8 铁路沿线 WSN 的部署方案 (单位: m)

表1 铁路沿线 WSN 的实际部署方案

	工作节点	p_a^*	网络能耗	寿命周期	节点部署特性
基于休眠机制	55 个	$\frac{11}{14}$	较低	较长	部署灵活, 只需部分节点工作
未考虑休眠机制	70 个	1	较高	略短	所有节点都工作, 损耗较大

模型,研究了铁路沿线环境不同因素对系统接收性能的影响,得到了最优工作节点比例,模拟了铁路沿线不同区域的 WSN 性能,并论证了铁路沿线 WSN 基于休眠机制的部署方案。此外,铁路 WSN 中的干扰信号严重影响着数据传输的成功率,因此在后续研究中,设计合理的通信协议和干扰消除算法对减少铁路无线通信网络中的干扰因素具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 新浪新闻中心. 英国一处山体滑坡导致附近铁路中断[Z]. 2008.
SINA News Center. A landslide in the UK caused the disruption of a nearby railway[Z]. 2008.
- [2] 端嘉盈, 史天运. 基于 WSN 的铁路防灾安全监控系统研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(1): 85-91.
DUAN J Y, SHI T Y. Study on WSN-based railway safety monitoring system [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(1): 85-91.
- [3] SILVA F. Industrial wireless sensor networks: applications, protocols, and standards [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(4): 67-68.
- [4] 张振海, 党建武, 闵永智. 基于无线传感网的铁路隧道环境无线监测系统[J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(4): 40-44.
ZHANG Z H, DANG J W, MIN Y Z. Design of wireless monitoring system for railway tunnel environment based on wireless sensor network[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2014, 33(4): 40-44.
- [5] 凡高娟, 孙力娟, 王汝传, 等. 非均匀分布下无线传感器网络节点调度机制[J]. 通信学报, 2011, 32(3): 10-17.
FAN G J, SUN L J, WANG R C, et al. Non-uniform distribution node scheduling scheme in wireless sensor networks[J]. Journal of Communications, 2011, 32(3): 10-17.
- [6] JEONG J, HWANG T, HE T, et al. MCTA: target tracking algorithm based on minimal contour in wireless sensor networks [C]// IEEE INFOCOM, May 6-12, 2007, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2007: 2371-2375.
- [7] BEHNAD A, NADER E S. Probability of node to base station connectivity in one-dimensional ad hoc networks [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(7): 650-652.
- [8] HE R, ZHONG Z, AI B, et al. Short-term fading behavior in

high-speed railway cutting scenario: measurements, analysis, and statistical models [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 2209-2222.

- [9] HE R, ZHONG Z, AI B, et al. Measurements and analysis of propagation channels in high-speed railway viaducts [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 794-805.
- [10] ZHEN C, LIU W, LIU Y, et al. Energy-efficient sleep/wake scheduling for acoustic localization wireless sensor network node[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014(1): 1-14.

[作者简介]



陈瑞凤(1989-), 女, 博士, 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所助理研究员, 主要研究方向为高速铁路运行环境监测无线传感器网络、物联网等。



倪明(1984-), 男, 中国铁路哈尔滨局集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为铁路旅客运输、铁路客运站车建设及信息化。



徐春婕(1976-), 女, 博士, 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所副研究员, 主要研究方向为高速铁路运行环境监测系统。



胡昊(1991-), 男, 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所工程师, 主要研究方向为交通信息工程及控制-模式识别与智能系统。