

DOI: 10.13382/j.jemi.2015.12.011

# 面向矿井机车的干扰管理移动网络调度策略\*

吴燎原<sup>1</sup> 韩江洪<sup>1,2</sup> 卫星<sup>1,2</sup> 石雷<sup>1,2</sup> 丁煦<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009; 2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心 合肥 230009;  
3. 合肥工业大学工业与装备技术研究院 合肥 230009)

**摘要:** 矿产行业是关于国民经济发展的支柱产业,井下机车信息的实时获取和处理离不开无线通信的方式。针对于井下大巷的一维线性特征和井下机车的可安排调度特征,提出了面向矿井机车的干扰管理移动网络通信及调度策略。首先建立了井下移动网络调度模型,该模型为非线性规划模型,无法直接求解。随后通过理论推导发现机车通信信噪比和机车运行速度、机车数据发送功率之间的关系,以及轨旁 AP 的覆盖范围和同时可接入机车数量之间的关系,并基于此设计了可自修正的干扰管理移动网络通信及调度策略,使得机车总通过时间和轨旁 AP 的布置达到整体最优。仿真结果显示该通信调度策略优化效果较之不采用干扰管理的井下移动网络有较大改进,其改进率在 30%~80%,且工作的时间越长,调度的车辆越多,总改进效果越好。

**关键词:** 干扰管理; 串行干扰消除; 矿井机车; 无线移动网络

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5015

## Scheduling strategy for the mine locomotive wireless mobile networks based on interference management

Wu Liaoyuan<sup>1</sup> Han Jianghong<sup>1,2</sup> Wei Xing<sup>1,2</sup> Shi Lei<sup>1,2</sup> Ding Xu<sup>1,2</sup>

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
2. Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China; 3. Institute of Industry and Equipment Technology of Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Mining industry is the pillar industry for the national economic development. The real-time information's acquisition and processing should be based on wireless communication. Since underground roadway has one-dimensional linear features and the mining locomotives can be scheduled, a scheduling strategy for the mine locomotive wireless mobile networks based on interference management is proposed. Firstly, the mobile wireless network scheduling model is proposed. This model is a non-linear programming model which can not be solved directly. Then based on the theoretical derivation, the relationship between the signal-noise ratio and the locomotive speed, between the signal-noise ratio and the locomotive transmitting power, and between the coverage of the access point and the number of the locomotives which can be connected with the AP simultaneously are found. Based on these relationships, a self-correction algorithm for the interference management mobile network scheduling model is designed. This algorithm can optimize the total scheduling time length and number of access points together. Simulations show that the optimization effect of the communication scheduling strategy is better than that of the underground mobile network without interference management, and the improvement rate is 30%~80%. Moreover, with the scheduling time becoming longer, the number of scheduling locomotives becoming bigger, the total optimization results will become better.

**Keywords:** interference management; successive interference cancellation; mine locomotive; wireless mobile network

收稿日期: 2015-04 Received Date: 2015-04

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61370088, 61501161)、国家国际科技合作专项(2014DFB10060)项目

# 1 引言

据统计 2001 年至 2013 年的 13 年间,我国煤矿共发生各类死亡事故 30 487 起,死亡 52 329 人<sup>[1]</sup>。各类矿山生产事故中,运输事故约占其中的 30%。井下大巷运输的主要方式是采用矿井轨道机车运输。现阶段,我国矿井机车均为人工驾驶,操作环境差,技术保障手段缺乏,这是导致轨道机车运输事故频发的重要原因之一<sup>[2]</sup>。因此,提升井下大巷运输工作的安全性和可靠性,是一个重要且急迫的任务。

无论采用何种方式来改善井下大巷运输工作的安全可靠,都离不开井下机车信息的实时获取和处理。矿井机车处在不断运动中,对它进行实时管理和控制离不开无线传输的方式。近年来,随着无线网络相关技术在理论和实现方面的不断前进,该领域出现了一些新的发展趋势。干扰管理(interference management, IM)<sup>[3]</sup>就是在此背景下的热门概念。它通过一些技术手段对干扰进行有效管理,使得这些信息不会互相干扰,从而极大地提高无线网络容量。可实现干扰管理的技术有多种,例如干扰消除、干扰对齐、多用户检测等<sup>[4-6]</sup>。文献[7]详细探讨了这些技术,并对它们的实现效果进行了比较。这其中,以串行干扰消除(successive interference cancellation, SIC)算法实现较简单,效果也不错,因此受到了广泛的关注。

SIC 算法采用串行的方式对接收信号判决并接收。它会首先根据接收功率的强弱对接收信号进行排序,然后对它们依次解码并接收。只要满足基本的香农公式约束,这个过程会一直进行下去<sup>[8]</sup>。SIC 算法是物理层的实现技术,要想在保证性能的前提下将其充分运用到无线网络中,必然需要在上层设计合适的算法和协议。现有研究已经在多种网络中探讨了该技术的应用前景和上层实现方式。例如文献[9]提出了一种基于 SIC 无线网络的任意衰落分布和路径损耗的统一研究框架,可用于分析异构蜂窝网络中的潜在收益。文献[10]提出了一种在异构蜂窝网络中基于 SIC 的多层分析模型,重点考察了当 AP 和移动终端随机布撒时无线传播信道的特性。文献[11]提出了在 CDMA 网络中,针对于不完善的系统,联合采用并行干扰消除(parallel interference cancellation, PIC)和 SIC

的框架模型,用于减轻多用户干扰。文献[12-14]则分别从不同角度对基于 SIC 的多跳无线网络进行了建模和求解。其中文献[12]提出了联合采用干扰避免和干扰使用的方式提升 SIC 网络整体性能,并最终建立了一个混合整数跨层规划模型,文献[13]在[12]的基础上提出了一种基于迭代的快速求解模型,文献[14]在文献[12]的基础上进一步考虑了控制数据传送速率对网络的影响。

然而,井下网络作为一种特殊的无线网络环境和传统网络有着很大的不同,这主要表现在以下两个方面<sup>[15]</sup>。第一,井下环境中,矿井机车处在不断移动中,且其移动具有较强的规律性。现有基于干扰管理的研究较少考虑这种特征,没有直接适合面向井下的干扰管理无线网络通信模型。第二,矿井机车的移动通常情况下是可以安排调度的,现有干扰管理相关研究成果较少考虑这种情况,没有研究尝试将基于干扰管理的井下通信算法和井下机车调度机制结合起来,联合设计相关的优化方案。

# 2 井下移动网络调度模型

考察一段时间内有  $n$  辆车依次发出并运行于总长度为  $X$  米的井下大巷中,如图 1 所示。在整个大巷的巷道旁安放若干轨旁接入点(access point, AP) 机车在运行过程中会通过 SIC 算法不间断地发送数据到 AP。轨旁 AP 的数量以及安放位置可以由系统人员设定。记  $S_i(i=1, \dots, n)$  表示第  $i$  辆车,  $b_j(j=1, \dots, m)$  表示第  $j$  个轨旁 AP。记所有机车组成的集合为  $N$ , 所有轨旁 AP 组成的集合为  $M$  亦即  $S_i \in N(i=1, \dots, n)$ ,  $b_j \in M(j=1, \dots, m)$ 。目标是通过安排每辆车的发车时间以及每个轨旁 AP 的安放位置,使得总通过时间段尽可能短以及轨旁 AP 的数量  $m$  尽可能小。

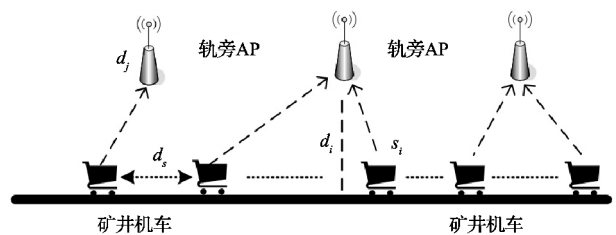


图 1 井下移动网络调度模型

Fig. 1 Underground mobile network model

设  $b_j$  距离轨道的垂直距离为  $d_j$  第辆车在时间点  $t$  距离  $b_j$  的距离为  $d_{s_i \rightarrow b_j}(t) (t \in [0, T])$  两辆机车间的最小安全间距为  $d_s$ 。由于实际井下环境中  $d_0$  约为 1 ~ 2m 而轨旁 AP 可覆盖范围一般在 100 m 以上 远大于该值 因此建模时可近似认为  $d_0 = 0$ 。亦即可将调度的网络抽象为一维网络结构 如图 2 所示。

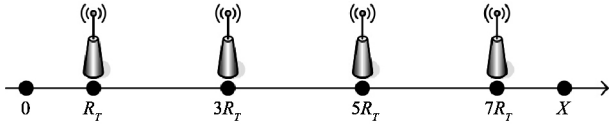


图 2 井下移动网络一维调度模型

Fig. 2 One-dimensional underground mobile network model

调度的最小和最大坐标分别为 0 和  $X$ 。设每个轨旁 AP 覆盖范围的半径为  $R_T$  这里  $R_T$  同时表示机车发送数据的最大传送半径 并且和当前 AP 同时连接的机车数量有关 后文将给出其计算方法。理想情况下 为了让轨旁 AP 的使用效率最大化 应该让它们按照覆盖范围等距地安排在巷道上 亦即轨旁 AP 的坐标依次为  $x_{b1} = R_T, x_{b2} = 3R_T, x_{b3} = 5R_T \dots$  且调度的总长度  $X = 2 \times m \times R_T$  如图 2 所示。

记  $S_i$  在时间点  $t$  的坐标为  $s_i(t)$  由于机车在整个时间段内是依次进入和离开的 亦即对于  $S_i$  而言 其在整个时间段内只有部分时间处在调度所讨论的巷道内。设  $S_i$  在  $t_i$  时间点进入  $b_1$  的覆盖半径内 在  $t'_i$  时间点离开  $b_m$  的覆盖半径 亦即  $x_i(t_i) = 0, x_i(t'_i) = X$  中间以速度  $v_i(t)$  行驶 则应有:

$$x_i(t) = \int_{t_i}^t v_i(t) dt \quad (t_i \leq t \leq t'_i) \quad (1)$$

设在时间点  $t$  时  $s_i$  处在  $b_j$  的覆盖范围内 令  $g_i(t)$  表示  $s_i$  对  $b_j$  的功率衰减 则有  $g_i(t) = \min \{ x_i(t)^{-\lambda}, 1 \}$  其中  $\lambda$  为衰减指数。令  $P_i(t)$  表示  $s_i$  在时间点  $t$  的发射功率 令  $P_{\min}, P_{\max}$  分别表示  $s_i$  所能调整的最小和最大发射功率 亦即  $P_{\min} \leq P_i(t) \leq P_{\max}$ 。令  $\theta_i(t)$  表示  $s_i$  在时间点  $t$  时对于  $S_0$  的信噪比 当采用 SIC 实现干扰管理时 多车可同时和  $b_j$  进行通信。此时 根据香农公式 应有:

$$\theta_i(t) = \frac{q_i(t) P_i(t)}{N_0 + \sum_{g_k(t) P_k(t) < g_i(t) P_i(t)} g_k(t) P_k(t)} \geq \beta \quad (2)$$

式中:  $N_0$  为噪声干扰  $\beta$  为阈值常数。分母中求和项

里的  $s_k$  是所有处在范围内 且  $s_k$  对  $b_j$  的接收功率小于  $s_i$  对  $b_j$  的接收功率的节点集合 亦即应满足  $g_k(t) P_k(t) < g_i(t) P_i(t)$ 。这是因为在 SIC 技术下 信号是按照功率强弱依次被接收端解码接收的。亦即当接收端尝试解码并接收  $s_i$  的信号时 比  $s_i$  接收功率强的信号必然已经被接收 因此分母中只有比  $s_i$  接收功率弱的信号会对  $s_i$  产生影响。后文为了表述方便 令集合  $A^j(t)$  表示在时间点时所有处于  $b_j$  范围内的节点 用  $A^j_{>i}(t)$  表示这其中满足  $g_k(t) P_k(t) > g_i(t) P_i(t)$  的节点  $s_k$  的集合 用  $A^j_{<i}(t)$  表示这其中满足  $g_k(t) P_k(t) < g_i(t) P_i(t)$  的节点  $s_k$  的集合。亦即式 (3) 中有  $s_k \in A^j_{<i}(t)$ 。

另外 对于每辆机车来说 其通信应有个基本的数据传输速率要求 记为  $r$ 。设所使用的频道带宽为  $W$  则应有:

$$W \log_2(1 + \theta_i(t)) \geq r \quad (3)$$

综上 问题模型可表达为:

$$\min(T + \rho m)$$

s. t

$$\begin{cases} x_i(t) = \int_{t_i}^{t'_i} v_i(t) dt & (S_i \in N) \\ \theta_i(t) = \frac{g_i(t) P_i(t)}{N_0 + \sum_{s_k \in A^j_{<i}(t)} g_k(t) P_k(t)} & (S_i \in N) \\ W \log_2(1 + \theta_i(t)) \geq r & (S_i \in N) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $T$  表示调度的总时间段 应有  $T = t'_n - t_1$   $\rho$  是加权因子。这是一个非线性规划模型 无法直接求解。

### 3 可自修正的干扰管理移动网络调度策略

直接推导的井下移动通信网络干扰管理模型为非线性规划模型 无法直接求解。为此需要通过合适的方式简化模型 并设计启发式算法求解。本节提出基于自修正的干扰管理移动网络调度策略 策略的整体思路是根据网络相关参数要求计算出每个 AP 能同时接入的最大机车数量以及在此情况下每个 AP 的覆盖范围 按此计算结果在巷道上布置 AP 并进一步计算机车的总通过时间和的优化效果。然后 在可接入机车数量的最小值和最大值之间 通过折半查找的方式不断寻求更优的 AP 布置方案和机车通信策略 进而不断修正优化结果 并获取最终的优化方案。

假定在时刻  $t$  时  $s_1, s_2, \dots, s_k$  同处于  $b_j$  的覆盖范围内,且它们是按照其对  $b_j$  的功率从小到大的排列顺序排列的,首先引入定理一。

定理一:令  $\gamma = \max\{2^{r/W} - 1, \beta\}$  井下环境中,  $s_i$  对  $b_j$  的信噪比满足  $\theta_i(t) = \gamma$  时耗能最小。

证明:证明将从以下两步进行。

1) 根据式 (2)、(3), 不难求得  $\theta_i(t) \geq \max\{2^{r/W} - 1, \beta\}$ 。

2) 由于  $g_i(t) = \min\{d^{-\lambda}, 1\} \geq 1$ , 根据 SIC 技术的解码顺序有:

$$P_1(t) = \frac{\theta_1(t) N_0}{g_1(t)} \geq \theta_1(t) N_0$$

$$P_2(t) = \frac{\theta_2(t) (N_0 + g_1(t) P_1(t))}{g_2(t)} \geq \theta_2(t) (N_0 + \theta_1(t) N_0)$$

$$P_k(t) \geq \theta_k(t) (N_0 + \sum_1^{k-1} \theta_i(t) N_0)$$

由于  $P_i(t) \in [P_{min}, P_{max}]$ , 显然上式中取  $\theta_1(t) = \theta_2(t) = \dots = \theta_k(t) = \max\{2^{r/W} - 1, \beta\}$  可以使每个  $P_i(t)$  尽可能小,此时更能保证方案的正确实现。证毕。

根据定理一,在设计方案时可以通过让所有车在任意时间点针对于  $b_j$  的信噪比都恰好等于  $\max\{2^{r/W} - 1, \beta\}$  时效果最好,亦即有  $\theta_1(t) = \theta_2(t) = \dots = \theta_k(t) = \gamma$ 。

注意到信噪比  $\theta_i(t)$  是一个和时间、距离、功率都有关系的变量。又由式 (1) 可知,距离是和机车发车时间,当前时间,以及机车运行速度相关的参数,而功率是可以人为调节的参数。因此,实际场景中,为了保证  $s_i$  在  $t \in [t_i, t'_i]$  时始终满足  $\theta_i(t) = \gamma$ , 应该让机车能够根据当前运行情况动态调节自身的发送功率  $P_i(t)$ , 亦即设计机车发送功率的动态调节方案。为此引入定理二、定理三和定理四。

定理二:当  $\theta_1(t) = \theta_2(t) = \dots = \theta_k(t) = \gamma$  满足时,机车速度是匀速还是变速不影响最终优化方案的优化效果。

证明:机车  $s_i$  速度变化将会影响其在时间点时的坐标  $x_i(t)$  并进而影响  $g_i(t)$ , 但无论如何变化都有  $x_i(t) \in [0, X]$ 。由于假定方案中信噪比为定值  $\gamma$ , 因此速度的变化只会间接影响到  $s_i$  的功率调整方案  $P_i(t)$  对优化目标不会产生影响。证毕。

定理二保证了在设计优化方案时可以让机车匀

速运行,这也更符合工程实际,从而将注意力集中在机车运行时的功率调整方案上。根据定理二,式 (1) 可重新表达为:

$$x_i(t) = v(t - t_i) \quad (t_i \leq t \leq t'_i) \quad (5)$$

定理三:对于任意  $b_j$ , 记  $\alpha$  表示当前同时接入的机车数量,亦即  $\alpha = |A'(t)|$ , 则  $\alpha$  应满足  $\alpha \leq \alpha_{max}$

$$\alpha_{max} = 1 + \log_{\gamma+1} \left( \frac{P_{max}}{\gamma N_0} \right)。$$

证明:假定在  $t$  时刻有  $\alpha$  辆车接入  $b_j$ , 且它们对  $b_j$  的接收功率大小满足:

$$g_1(t) P_1(t) < g_2(t) P_2(t) < \dots < g_\alpha(t) P_\alpha(t)。$$

根据 SIC 成功解码的条件,必有:

$$g_1(t) P_1(t) = \gamma N_0$$

$$g_2(t) P_2(t) = \gamma (N_0 + g_1(t) P_1(t)) = \gamma (N_0 + \gamma N_0) = \gamma (1 + \gamma) N_0$$

$$g_3(t) P_3(t) = \gamma (N_0 + g_2(t) P_2(t) + g_1(t) P_1(t)) = \gamma (N_0 + \gamma N_0 (1 + \gamma) + \gamma N_0) = \gamma (1 + \gamma)^2 N_0$$

$$\vdots$$

$$g_\alpha(t) P_\alpha(t) = \gamma (1 + \gamma)^{(\alpha-1)} N_0$$

根据上式可得到  $\alpha = 1 + \log_{\gamma+1} \left( \frac{P_\alpha(t) g_\alpha(t)}{\gamma N_0} \right) ,$

因为  $P_\alpha(t) \leq P_{max}$ ,  $g_\alpha(t) = \min\{x_\alpha(t)^{-\gamma}, 1\} \leq 1$ , 因此有  $\alpha \leq \alpha_{max} = 1 + \log_{\gamma+1} \left( \frac{P_{max}}{\gamma N_0} \right)。$

定理三给出了轨旁 AP 可同时接入的最大机车数量,亦即调度方案只需同时考虑最多  $\alpha_{max}$  辆车的功率调整方案。

定理四:对于任意  $b_j$ , 当  $P_i(t) \in [P_{min}, P_{max}]$  时,应有  $R_T = \left( \frac{\gamma(1+\gamma)^{(\alpha-1)} N_0}{P_{max}} \right)^{-1/\gamma}$ , 其中  $\alpha$  为当前  $b_j$  下实际接入的机车数目。

证明:假定在时刻有  $\alpha$  辆车接入  $b_j$ , 类似于定理三的证明,不难得到:  $g_\alpha(t) P_\alpha(t) = \gamma (1 + \gamma)^{(\alpha-1)} N_0$ , 亦即:

$$x_\alpha(t) = \left( \frac{\gamma(1+\gamma)^{(\alpha-1)} N_0}{P_\alpha(t)} \right)^{-1/\lambda} \leq \left( \frac{\gamma(1+\gamma)^{(\alpha-1)} N_0}{P_{max}} \right)^{-1/\lambda} = R_T$$

证毕。

观察  $R_T$  的表达式不难发现,其值的大小是和接入机车数量相关的一个函数。亦即对于同一个  $b_j$  来说,其同时接入的机车数量越多,所花费的总通过时间越短,但同时其覆盖范围越小,整个大巷中需要布置的轨旁 AP 数量就越多。因此,需要通过合理的方式设定合适的接入机车数量以便达到最好的优化效果。

当  $\gamma, \alpha, R_T$  等参数确定后,即可以此作为初始方案。另一方面,受安全距离  $d_s$  的限制  $b_j$  可同时容纳的机车数量还应同时满足  $\alpha \leq \frac{2R_T}{d_s}$ 。因此,对于初始方案进行修正,使其满足安全距离要求,并让机车依次等间距的从初始点发出,从而可以求解出一组  $t_i, t'_i$  以及  $m$ ,并进而确定当前  $(T + \rho m)$  的值。将该值记录下来,修改每个 AP 同时接入的车辆数目,并通过折半查找的方式继续寻找更小的  $(T + \rho m)$  的值……通过这种修正反复进行下去,即可找到最终的优化方案。图 3 给出了基于自修正的干扰管理移动网络调度策略的算法流程。

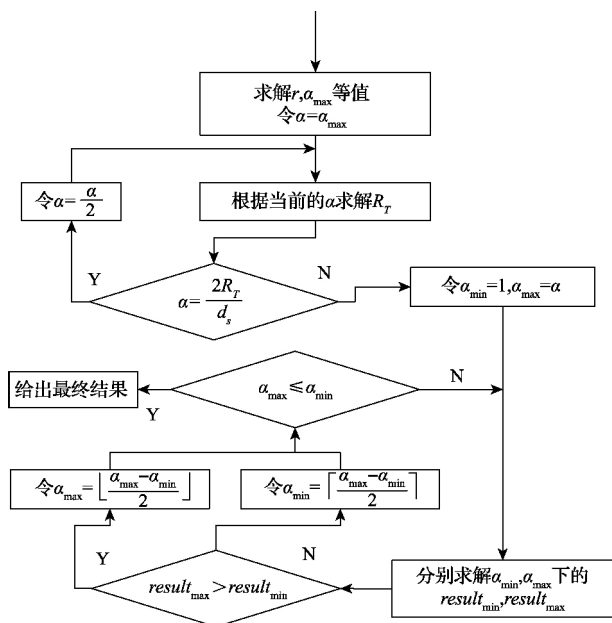


图 3 可自修正的干扰管理移动网络调度策略算法流程

Fig. 3 The algorithm flowchart for the self-correction interference management mobile network scheduling model

另外,为了保证信噪比始终为常数  $\gamma$ ,机车在运行时需要根据当前位置对功率进行连续调整。可

以求得机车  $s_k$  的功率变化函数如式 (6) 所示,其中  $x_{b_j}$  表示在时间点  $t$  时  $s_k$  所属  $b_j$  的坐标。

$$P_k(t) = \frac{N_0 \gamma (1 + \gamma)^{(k-1)}}{\min\{|v(t - t_k) - x_{b_j}|^{-\gamma}, 1\}} \quad (6)$$

### 4 仿真结果及分析

给出具体网络的仿真结果。参数设置如下。阈值  $\beta = 3$ , 衰减系数  $\gamma = 4$ , 噪声干扰瓦  $N_0 = 10^{-10}$ , 功率瓦  $P_{\max} = 1 \text{ W}$ ,  $P_{\min} = 0 \text{ W}$ , 带宽  $W = 22 \text{ MHz}$ , 要求的最小数据传输速率为  $r = 1 \text{ Mbps}$ , 加权因子  $\rho = 100$ 。假设巷道的总长度为 1 公里,需调度的车辆为 10 辆,车速  $v = 8 \text{ m/s}$ ,安全距离  $d_s = 30 \text{ m}$ 。

根据 SIC 技术的解码要求,可解得  $\alpha_{\max} = 4$ ,此时  $R_T = 84.95 \text{ m}$ ,采用基于自修正的干扰管理移动网络调度策略求解后,可解得  $\alpha = 2$ ,  $R_T = 169.90 \text{ m}$ ,10 辆车的总通过时间为  $T = 316.14 \text{ s}$ ,所需要的轨旁 AP 的个数  $m = 3$ ,此时的优化结果  $T + \rho m = 616.14$ ,而不采用 SIC 技术时,可解得  $T + \rho m = 965.63$ ,亦即改进率为  $\frac{965.63 - 616.14}{965.63} = 36.19\%$ 。

图 4 给出了第一、二辆机车行驶在第一个 AP 范围内的发送功率变化曲线。从图中可以看出机车发送功率在一个 AP 范围内的行驶过程中经历了从大到小在到大的变化,这是因为在中间部分离 AP 距离较近,因此发送功率小,两端距离 AP 较远,因此发送功率大。由于最优解下  $\alpha = 2$ ,因此后面八辆机车的功率变化曲线同机车一和二的功率变化曲线。

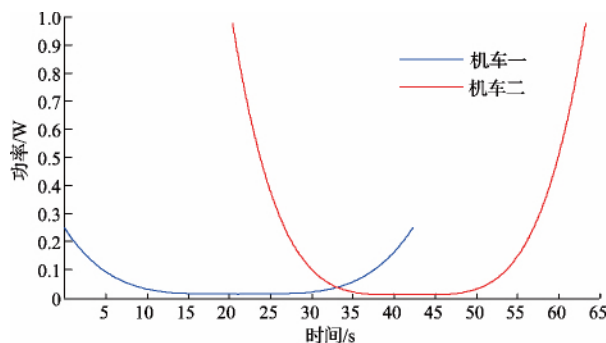


图 4 前两辆机车在第一个 AP 范围内的功率变化曲线

Fig. 4 The dynamical power curves for the first two locomotives in the range of the first AP

为了对算法性能进一步分析,修改模型中相关参数,并得到以下结果。

1) 保持其他参数不变,让车辆速度从 3 ~ 15 m/s 变化,分别绘出  $\alpha$  从 1 ~ 4 的优化结果曲线,得到效果如图 5 所示。由图可见,在车速较符合矿井机车实际速度的情况下(6 ~ 10 m/s),相比传统方案( $\alpha = 1$ ),采用 SIC 技术后效果都有了提升。其中车速越慢,优化效果越好,当车速较快时优化效果不明显。因此本文算法适合于车速有一定限制要求的井下机车使用。

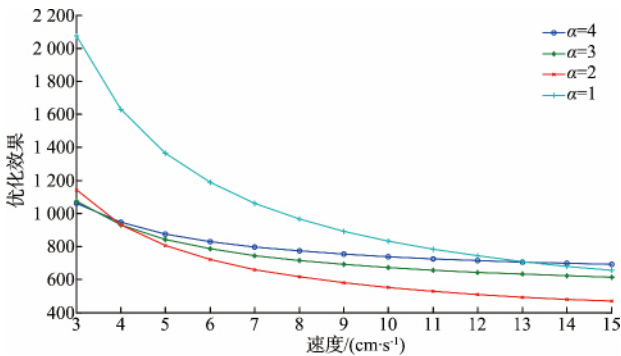


图 5 机车速度变化时的不同优化效果比较

Fig. 5 Different optimization results when the locomotive speed change

2) 保持其他参数不变,把调度的巷道总长度改为 10 公里,总车辆数从 100 ~ 1 000 变化,得到优化结果如图 6 所示。由图可见,随着车辆数目的增加,传统方案下( $\alpha = 1$ )的优化效果以线性趋势明显变差,而采用 SIC 技术设计算法则以较慢的趋势变化。亦即调度的车辆越多,本文算法的实现效果越好。因此本文算法适合于在巷道环境下经常反

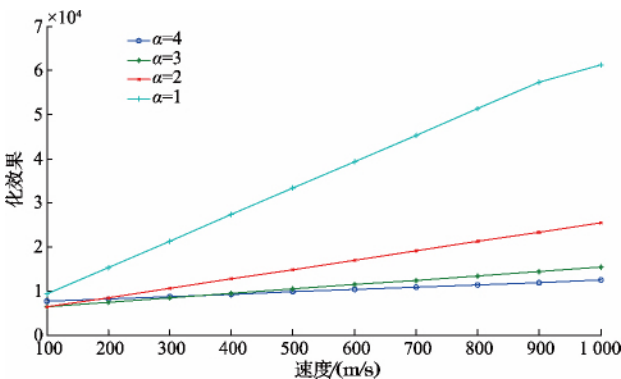


图 6 机车数量变化时的不同优化效果比较

Fig. 6 Different optimization results when the locomotive number change

复性的车辆调度工作。表 1 直接给出了在此参数设定下的改进率变化情况。

表 1 传统方案和本文方案优化效果比较

Table 1 The comparison for the traditional program and the program in this paper

车辆数	传统方案下 $T + \rho_m$	本文算法下 $T + \rho_m$	改进率 (%)
100	9 296.96	6 352.57	31.67
200	15 303.99	7 442.33	51.37
300	21 311.02	8 443.50	60.38
400	27 318.04	9 444.67	65.43
500	33 325.07	9 799.45	70.59
600	39 332.10	10 330.40	73.74
700	45 339.13	10 861.35	76.04
800	51 346.16	11 392.30	77.81
900	57 353.19	11 923.25	79.21
1 000	63 360.22	12 454.20	80.34

### 5 结 论

针对于井下环境中的矿井机车移动网络,设计了基于自修正的干扰管理移动通信策略。仿真结果显示该算法具有很好的性能,尤其是当机车速度和机车数量接近于工程实际环境时效果更好。

建立的基于干扰管理的移动通信网络调度策略只考虑了单轨直道环境。目前,井下大巷中常见的轨道还包括弯道、三岔道等。因此如何改进本文算法使其适用于更复杂的井下大巷环境,是下一步的研究工作。

### 参考文献

[1] 邓奇根,王燕,刘明举,等. 2001 ~ 2013 年全国煤矿事故统计分析及其启示[J]. 煤炭技术,2014,33(9): 73-75.  
DENG Q G, WANG Y, LIU M J, et al. Statistic analysis and enlightenment on coal mine accident of china from 2001-2013 periods [J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 73-75.

[2] 陆阳,方欢,李谦,等. 机车运输调度系统的 HCPN 模型及性能测量方法[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(1): 7-17.  
LU Y, FANG H, LI Q, et al. HCPN model and performance measurement method of locomotive transportation dispatching system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(1): 7-17.

- [3] NGO D T, LE L B, LE-NGOC T, et al. Distributed interference management in two-tier CDMA femtocell networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(3): 979-989.
- [4] HAN F, LIU K J R. A multiuser TRDMA uplink system with 2D parallel interference cancellation [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(3): 1011-1022.
- [5] MIRIDAKIS N, VERGADOS D D. A survey on the successive interference cancellation performance for single-antenna and multiple-antenna OFDM systems [J]. *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, 2013, 15(1): 312-335.
- [6] 杨洁, 宋荣方, 董恒. 基于干扰信道的干扰对齐算法综述 [J]. *南京邮电大学学报: 自然科学版*, 2012, 32(4): 1-8.  
YANG J, SONG R F, DONG H. An overview of interference alignment based on interference channel [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science*, 2012, 32(4): 1-8.
- [7] ANDREWS J G. Interference cancellation for cellular systems: a contemporary overview [J]. *Wireless Communications*, IEEE, 2005, 12(2): 19-29.
- [8] 石雷, 石怡, 魏振春, 等. 基于干扰管理的无线网络跨层算法研究和设计 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(11): 1005-1010.  
SHI L, SHI Y, WEI ZH CH, et al. Cross-layer algorithm for the wireless network with interference management [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(11): 1005-1010.
- [9] ZHANG X, HAENGGI M. The performance of successive interference cancellation in random wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(10): 6368-6388.
- [10] WILDEMEERSCH M, QUEK T Q S, KOUNTOURIS M, et al. Successive interference cancellation in heterogeneous networks [J]. *Communications*, IEEE Transactions on, 2014, 62(12): 4440-4453.
- [11] SASIPRIYA S, RAVICHANDRAN C S. Performance analysis of overloaded CDMA system under imperfect synchronization using Parallel/Successive Interference Cancellation [J]. *Telecommunication Systems*, 2014, 56(4): 509-518.
- [12] JIANG C, SHI Y, HOU Y T, et al. Squeezing the most out of interference: An optimization framework for joint interference exploitation and avoidance [C]. *INFOCOM*, 2012 Proceedings IEEE. IEEE, 2012: 424-432.
- [13] SHI L, SHI Y, YE Y, et al. An efficient interference management framework for multi-hop wireless networks [C]. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2013 IEEE. IEEE, 2013: 1434-1439.
- [14] QU L, HE J, ASSI C. Understanding the benefits of successive interference cancellation in multi-rate multi-hop wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(7): 2465-2477.
- [15] 韩江洪, 汪鹏, 魏振春, 等. 基于位置的井下移动通信网络无缝切换机制 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(10): 1092-1099.  
HAN J H, WANG P, WEI ZH CH, et al. Seamless handoff mechanism of underground mine mobile communication networks based on location [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2014, 28(10): 1092-1099.

### 作者简介

吴燎原, 1973 年出生, 合肥工业大学科学技术研究院技术转移主管, 硕士。主要研究方向为无线网络算法设计及优化、流媒体传输技术。

E-mail: Wliaoyuan@163.com

Wu Liaoyuan was born in 1973, director of technology transformation in Institute of Science and Technology, Hefei University of Technology. His main research interests include design and optimization of wireless network algorithm and Streaming technologies.

韩江洪, 1954 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机网络与通信、计算机控制、物联网。

E-mail: hanjh@hfut.edu.cn

Han Jianghong was born in 1954, professor and Ph. D. supervisor in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His main research interests include computer network and communication, computer network, internet of things.

卫星 (通讯作者), 1980 年出生, 2009 年于中国科学技术大学获得博士学位, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师。研究方向为汽车电子、嵌入式系统和物联网。

E-mail: weixing72510@163.com

Wei Xing (Corresponding author) was born in 1980, achieved Ph. D. of University of Science and Technology of China in 2009. He is an associate professor and a M. Sc. supervisor in Hefei University of Technology. His research interests include automotive, embedded system and internet of things.

石雷, 1980 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院副教授, 硕士生导师。主要研究方向为无线网络算法设计



及优化。

E-mail: shilei@ialab.hfut.edu.cn

**Shi Lei** was born in 1980, and now he is an associate professor and a M. Sc. supervisor in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His present research interests include the design and optimization of wireless network algorithm.

丁煦, 1984 年生, 现合肥工业大学工业与装备技术研

究院讲师。主要研究方向为无线传感器网络优化、控制论和自动控制。

E-mail: dixon.ding@aliyun.com

**Ding Xu** was born in 1984. He is now with the Institute of Industry and Equipment Technology of Hefei University of Technology. He is now an assistant professor. His main research interests include the optimization of wireless sensor networks, cybernetics and automatic control.

## 是德科技发布面向电子和工业应用的手持式数字万用表

新手持式数字万用表能够帮助工程师信心十足地开展长时间的测试与故障诊断

新闻摘要:

• 延长的电池寿命可以支持更长时间的测试和数据记录

• IP 67 认证防尘和防水性能

• 手持仪表记录软件支持数据记录与分析

是德科技公司日前发布两个新的手持数字万用表(DMM)系列。U1280 系列和 U1240C 系列手持数字万用表不仅能够提供电子和工业测试领域需要的功能与测量特性,而且具有出色的防护和更长的电池寿命,可以支持更长时间的测试与数据记录。

作为是德科技最高性能的手持数字万用表, U1280 可以提供 60 000 计数的显示分辨率和 0.025% 的精度。并且, U1280 系列 4.5 位手持数字万用表具有出色的精度、准度和可复验性,能够满足电子测试行业严苛的电子制造、安装与维护任务要求。

U1240C 系列 4 位手持式数字万用表提供 10 000 计数显示分辨率和 0.09% 精度,可以满足广泛的工业设施安装与维护测量功能需求。U1240C 系列配有 ZLOW 和谐波比等特性。ZLOW 支持能够消除杂散电压的低阻抗模式,谐波比功能可以显示谐波的存在。

是德科技副总裁兼通用电子测量事业部总经理 EeHuei Sin 表示“更长的电池寿命和 IP 67 认证是 U1280 系列和 U1240C 系列设计可靠性的体现。全新的手持数字万用表系列能够增强工程师的信心,支持更长时间的测试与故障诊断,满足严苛的电子或工业应用要求。”

U1280 系列和 U1240C 系列卓越的防护非常适合现场应用。新的手持数字万用表系列通过了 IP 67 认证,可以提供全面的防尘和 1 m 深防水以及 3 m (10 英尺) 防摔特性。此外, U1240C 符合 CAT IV 600 V 和 CAT III 1 000 V 标准,能够确保电气测试与测量安全。两个新的手持数字万用表系列具有更长的电池寿命,能够支持长时间的连续测试: U1280 系列达 800 h, U1240C 系列达 400 h。该特性非常适合需要确保生产线正常运行和防止意外关停的工业测试应用。

手持仪表记录软件能够提供更多高级的功能和数据记录特性(下载地址 [www.keysight.com/find/hhmeterlogger](http://www.keysight.com/find/hhmeterlogger))。该款 PC 软件支持用户以趋势图或表格形式自动记录数据,或通过按键手动记录每次测量结果。完成记录后,用户可以将记录数据转变为不同的测试报告格式。U1280 系列和 U1240C 系列兼容是德科技远程连接解决方案,能够实现远程监测,以改善恶劣环境下的测试安全性和便利性。

了解更多关于 U1280 系列 4.5 位手持数字万用表的信息,请访问 [www.keysight.com/find/U1282A\\_pr](http://www.keysight.com/find/U1282A_pr)。了解更多关于 U1240C 系列 4 位手持数字万用表的信息,请访问 [www.keysight.com/find/U1242C\\_pr](http://www.keysight.com/find/U1242C_pr)。查看高分辨率图片,请访问 [www.keysight.com/find/handheldmms\\_images](http://www.keysight.com/find/handheldmms_images)。观看产品视频,请访问 [www.keysight.com/find/handheldmms\\_video](http://www.keysight.com/find/handheldmms_video)。查看完整的手持工具视频列表,请访问是德科技手持工具 YouTube 频道。