

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.018

基于干扰管理的矿井机车动态功率调度方法*

石雷^{1,2} 高宇¹ 吴燎原¹ 卫星^{1,2} 魏振春^{1,2}

(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)

摘要:现有研究很少有直接适用于矿井机车的无线网络通信模型。针对矿井机车不断移动的特性,提出基于干扰管理的矿井机车动态功率调度方法。首先根据传统矿井机车通过程,建立一种基于 SIC 的动态功率调度模型。为了使该模型可以在多项式时间内求解,提出 SIC 集合和最大 SIC 集合概念,并设计了一个求解所有最大 SIC 集合的算法,有效的降低求解问题的复杂度。仿真显示,该方法优化效果较之采用普通 SIC 方法改进率在 20% ~ 35%, 相比于传统方法改进率在 40% ~ 50%。

关键词: 干扰管理; 矿井机车; 动态功率调度; 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

Mine locomotive dynamic power scheduling method based on interference management

Shi Lei^{1,2} Gao Yu¹ Wu Liaoyuan¹ Wei Xing^{1,2} Wei Zhenchun^{1,2}

(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)

Abstract: There are few existing studies which are directly suitable for the mine locomotive wireless network communication model. According to the characteristics of mine locomotive constantly moving, the mine locomotive dynamic power scheduling method based on the interference management is proposed. First, according to the traditional mine locomotive communication process, a dynamic power scheduling model based on SIC is established. To make the model can solve in polynomial time, SIC set and maximum SIC set concept is proposed, and an algorithm for solving all the biggest SIC set is designed to effectively reduce the complexity of the solving problem. The simulations show that the improvement rate of the optimization effect of the method than ordinary SIC method is of between 20% ~ 35%, and the improvement rate is of between 40% ~ 50% compared to traditional methods of no SIC.

Keywords: interference management; mine locomotive; dynamic power scheduling; wireless mobile net

1 引言

矿井机车广泛应用于矿产行业的运输,然而由于井下环境的复杂性和危险性,运输事故频发。因此,提升矿井机车运输的安全性和可靠性势在必行。矿井机车实时信息的获取和处理是提升井下运输安全可靠性的关键,只有采用无线的方式才能对处在移动中的矿井机车进行

实时监控和管理^[1]。

近年来,通过干扰管理^[2] (interference management, IM) 的方式优化管理不同信号间的干扰并提高网络吞吐量正受到越来越多的重视。干扰的有效管理是改善现行无线通信网络的关键^[3]。干扰消除^[4]、干扰对齐^[5]、多用户检测^[6] 都是实现干扰管理的常用技术。这其中,串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 算法因其实现简单和效果良好而备受关注。

井下网络不同于传统网络^[7], 矿井机车移动性的特点, 使得其对于轨旁接入点 (access point, AP) 的信噪比不断变化。现有文献建立的无线通信模型多是基于常见的网络框架, 没有直接适合面向井下的干扰管理无线网络通信模型。例如文献[8]针对 IEEE802.15.4 的工业无线网络 DL 子网的特点, 提出了一种基于确定性调度与链路质量的前 k 优路径路由算法, 有效改善通信过程中的确定性和高可靠性问题。文献[9]根据三维环境中的移动自组织无线网络 (MAWN) 部署的特点, 构建了一种新型三维节点半随机移动模型 (3D_NMM), 有效提升了移动无线自组织网络的应用效能。文献[10]利用跨层设计技术, 基于链路状态和节点干扰的容量预测模型, 提出一种基于位置的容量感知路由优化算法 LCAR, 实现统计的 QoS 网络资源预留以及分组转发, 提高网络资源利用率。而建立的干扰管理模型多是基于固定基站、固定节点等诸多限制下的单跳或多跳网络模型。例如文献[11]基于干扰管理, 针对固定基站多跳无线网络环境, 设计了一种高容量跨层优化策略。文献[12-13]都是针对固定节点探讨干扰管理通信模型及其算法, 以提高网络吞吐率作为优化目标。

2 系统模型

2.1 传统矿井机车移动通信模型

如图 1 所示矿井机车移动通信模型。考虑在两条平行的直道上行驶若干辆机车, 方向相反, 轨道边侧装备着若干 AP。机车在行驶过程中会和 AP 通信, 并通过 AP 将行驶状态数据发送到地面控制中心。通信网络物理层采用 SIC 技术, 因此 AP 在一定条件下可同时接收多辆机车发来的数据信息。假定所有机车的速度相同, 且发车时间已知, 目标是设计合适的算法决定机车发送功率以及和 AP 的通信规律, 从而使网络吞吐量最大。由于基于单 AP 的算法可直接推广到多 AP 的环境下, 因此下文将直接设计基于 SIC 的单 AP 算法。

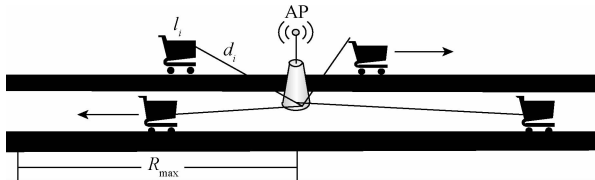


图 1 矿井机车移动通信模型

Fig. 1 Mobile communication model of mine locomotive

用 N^+ 和 N^- 分别表示调度时间段内第 1 条轨道上和第 2 条轨道上的所有机车组成的集合, $l_i (l_i \in N^+ \cup N^-)$ 为第 i 辆机车, $t (t \in T)$ 为在整个调度时间 T 的时间点, 假设在整个调度时间内 n 辆机车将会依次通过轨道。用

t_i^s 表示 l_i 进入 AP 范围时的时间点, 用 t_i^e 表示 l_i 离开 AP 范围时的时间点, $d_i(t)$ 表示 l_i 在时间点 t 时与 AP 之间的距离, $x_i(t)$ 表示 l_i 在时间点 t 时在轨道上的坐标, 显然有 $d_i(t) = |x_i(t)|$ 。特别的, 令 AP 的坐标为 $x_{AP} = 0$ 。设 λ 为路径损耗指数, 则 l_i 与 AP 之间的信号衰减公式为:

$$g_i(t) = \min\{(d_i(t))^{-\lambda}, 1\}$$

$$l_i \in N^+ \cup N^-; t_i^s \leq t \leq t_i^e \quad (1)$$

设 R_{max} 为 AP 的最大通信范围, 用 v 表达机车的行驶速度, 则:

$$x_i(t) = -R_{max} + v(t - t_i^s)$$

$$t_i^s \leq t \leq t_i^e; l_i \in N^+ \quad (2)$$

$$x_i(t) = R_{max} - v(t - t_i^s)$$

$$t_i^s \leq t \leq t_i^e; l_i \in N^- \quad (3)$$

用 $p_i(t) (0 \leq p_i(t) \leq P_{max})$ 表示 l_i 在时间点 t 的传输功率, 其中 P_{max} 是机车可采用的最大发送功率。因此, R_{max} 可表达为:

$$R_{max} = \left(\frac{P_{max}}{\beta}\right)^{1/\lambda} \quad (4)$$

式中: β 是阈值常数。显然, 只有当 $d_i(t) \leq R_{max}$ 时 l_i 才可以正确的传输。

SIC 算法的工作原理描述如下。AP 首先根据接收到的机车的数据功率的强弱对信号进行排序, 然后从强到弱对信号依次解码并接收。只要满足基本的香农公式约束, 这个过程会一直进行下去^[14]。而一旦香农约束无法满足, 则剩余的数据包都将无法解码。因此需根据机车发送到 AP 的信号强弱状态安排其发送规律。为此定义二值变量 $\theta_i(t)$ 如下:

$$\theta_i(t) = \begin{cases} 1, & l_i \text{ 在时间点 } t \text{ 上} \\ & \text{进行数据传输} \\ 0, & l_i \text{ 在时间点 } t \text{ 上} \\ & \text{没有数据传输} \end{cases} \quad (5)$$

显然如果 $\theta_i(t) = 0$, 则必有 $p_i(t) = 0$ 。

用 $\gamma_i(t)$ 表示 l_i 在时间点 t 的信噪比 (signal and interference to noise ratio, SINR), 则:

$$\gamma_i(t) = \frac{p_i(t)g_i(t)}{N_0 + \sum p_j(t)g_j(t)\theta_j(t)} \geq \beta$$

$$l_i, l_j \in N^+ \cup N^-; i \neq j; \theta_i(t) = 1 \quad (6)$$

式中: N_0 是噪声功率, l_j 是 AP 接受功率比 l_i 小的所有机车。

假设每个机车 l_i 要求的最小数据传输速率为 r_i , 目标是最大化共同尺度因子 K , 使得所有机车都能以 Kr_i 的速率传输数据。即:

$$Kr_i \leq \frac{\int_{t_i^s}^{t_i^e} W \log_2(1 + \beta)\theta_i(t) dt}{t_i^e - t_i^s} \quad (7)$$

式中: W 是带宽。综上所述, 目标是求 $Max(K)$, 约束条件为:

$$\begin{cases} (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) \\ K \geq 0, l_i, l_j \in N^+ \cup N^- \end{cases} \quad (8)$$

显然式(8)是一个非凸问题(non-convex 问题), 无法直接求解。

2.2 基于 SIC 的动态功率调度模型

观察式(8)发现, 原始模型之所以无法直接求解, 主要是由于时间 t 为连续变量, 进而造成式(8)中出现了积分符号。为此, 需对式(8)进行化简, 去除积分符号。

首先将整个调度时间 T 划分成 m 个时间段, 时间段的集合为 M , 时间段 k 的长度为 $Y_k (Y_k \in M)$ 。时间段的划分规则遵循两个基本条件: 1) 时间段内调度机车不会改变, 也就是说没有机车离开或进入 AP 的范围; 2) 时间段长度较短, 机车和 AP 之间的距离不会改变太多, 可近似认为是定值。因此相当于将原始问题划分为 m 个子问题, 然后对每个子问题分别求解优化。

对每个时间段进一步处理, 将其划分成若干时间片, 用 τ_i 表示时间片 i 在 Y_k 里的长度, 则有 $\sum_{\tau_i \in Y_k} \tau_i = Y_k$ 。假设在每一个时间片里 l_i 的传输功率保持不变, 可将原二值变量 $\theta_i(t)$ 表达为新的二值变量 $\theta_i(\tau)$, 即:

$$\theta_i(\tau) = \begin{cases} 1, l_i \text{ 在时间片 } \tau \text{ 上} \\ \text{进行数据传输} \\ 0, l_i \text{ 在时间片 } \tau \text{ 上} \\ \text{没有数据传输} \end{cases} \quad (9)$$

于是式(7)可转换为式(10):

$$K r_i \leq \frac{\sum_{Y_k \in M} \sum_{\tau \in Y_k} W \log_2(1 + \beta) \theta_i(\tau) \tau}{t_i^c - t_i^s} \quad (10)$$

式(10)右部是一个凸函数, 因此可以将这个问题继续分解成 m 个子问题, 即:

$$K_k r_i \leq \frac{\sum_{\tau \in Y_k} W \log_2(1 + \beta) \theta_i(\tau) \tau}{Y_k} \quad (11)$$

$Y_k \in M; l_i \in N^+ \cup N^-$
式中: K_k 是在一个时间段 k 内的共同尺度因子。

另一方面, 根据假定可知, 在每个时间片内可认为机车的发送功率为一定值, 用 $p_i(\tau)$ 代替 $p_i(t)$, 亦即在时间片 τ 里 l_i 的发送功率保持不变。同时可以求出在时间段 Y_k 里 l_i 距离 AP 的最大距离 d_{ik}^{\max} 和最小距离 d_{ik}^{\min} , 从而进一步求出最大信道增益 g_{ik}^{\max} 和最小信道增益 g_{ik}^{\min} 。为了计算 $\gamma_i(\tau)$, 使用最小信道增益作为信号发送功率, 最大信道增益作为的信号干扰功率。基于上述讨论, 式(6)可转换为:

$$\gamma_i(\tau) = \frac{g_{ik}^{\min} p_i(\tau) \theta_i(\tau)}{N_0 + \sum g_{jk}^{\max} p_j(\tau) \theta_j(\tau)} \geq \beta$$

$$l_i, l_j \in N^+ \cup N^-; \theta_i(\tau) = 1; \tau \in Y_k \quad (12)$$

综上, 模型目标转变为求 $Max(K_k)$ 。约束条件是:

$$\begin{cases} R_{\max} = \left(\frac{P_{\max}}{\beta} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \\ \begin{cases} x_{ik}^{\min} = R_{\max} - v(\tau_k^s - t_i^s) \\ x_{ik}^{\max} = R_{\max} - v(\tau_k^c - t_i^s) \end{cases} (l_i \in N^-) \\ \begin{cases} x_{ik}^{\min} = -R_{\max} + v(\tau_k^s - t_i^s) \\ x_{ik}^{\max} = -R_{\max} + v(\tau_k^c - t_i^s) \end{cases} (l_i \in N^+) \\ g_{ik}^{\max} = \min\{|x_{ik}^{\min}|^{-\lambda}, 1\} \\ g_{ik}^{\min} = \min\{|x_{ik}^{\max}|^{-\lambda}, 1\} \\ \gamma_i(\tau) = \frac{g_{ik}^{\min} p_i(\tau) \theta_i(\tau)}{N_0 + \sum g_{jk}^{\max} p_j(\tau) \theta_j(\tau)} \geq \beta \\ K_k r_i \leq \frac{\sum_{\tau \in Y_k} W \log_2(1 + \beta) \theta_i(\tau) \tau}{Y_k} \\ (K_k \geq 0, l_i, l_j \in N^+ \cup N^-, \tau \in Y_k, Y_k \in M) \end{cases} \quad (13)$$

式中: τ_k^s 和 τ_k^c 分别表示时间段 Y_k 的起始点和结束点。在式(13)中 K_k, τ, Y_k 是实数型的变量, $\theta_i(\tau)$ 是 0~1 二值变量, 剩下的如 W, τ_k^s 和 τ_k^c 等都是常数或者直接算出。所以上述模型是一个混合整数规划(mixedInteger linear programming, MILP)模型。但是 MILP 模型仍是一个 NP-hard 问题, 无法直接解决。

3 最大 SIC 集合算法

第2节建立的系统模型为 MILP 模型, 无法直接求解。本节将提出 SIC 集合和最大 SIC 集合的概念, 在此基础上设计出一个具有多项式时间复杂度的算法, 并将其命名为“最大 SIC 集合算法”, 从而最终获得问题的求解方案。

3.1 问题初探

观察式(13)可发现变量 $p_i(\tau)$ 和 $\theta_i(\tau)$ 是使原求解模型成为 NP-hard 问题的关键原因, 因此求解方案将主要针对这两个变量进行优化。首先引入定理1。

定理1 若在时间片 τ 内存在 $\hat{p}_i(\tau)$ 使得 $\gamma_i(\tau) = \beta$, 则机车 l_i 的发送功率取 $\hat{p}_i(\tau)$ 时可使得整体方案达到最优。

证明: 令机车 l_i 当前的发送功率为 $p_i(\tau)$ 。若 $p_i(\tau) < \hat{p}_i(\tau)$, 那么 $\gamma_i(\tau) = \frac{g_{ik}^{\min} p_i(\tau) \theta_i(\tau)}{N_0 + \sum g_{jk}^{\max} p_j(\tau) \theta_j(\tau)} < \frac{g_{ik}^{\min} \hat{p}_i(\tau) \theta_i(\tau)}{N_0 + \sum g_{jk}^{\max} p_j(\tau) \theta_j(\tau)} = \beta$ 矛盾, 所以 $p_i(\tau)$ 不可能比 $\hat{p}_i(\tau)$ 小。若 $p_i(\tau) > \hat{p}_i(\tau)$, 假设此时还有一个机

车 l_j 可以使用功率 $\hat{p}_i(\tau)$ 和 l_i 进行传输, 假设 $g_{jk}^{\min} p_j(\tau) > g_{ik}^{\min} \hat{p}_i(\tau)$ 。那么定有 $\gamma_j(\tau) = \frac{g_{jk}^{\min} p_j(\tau) \theta_j(\tau)}{N_0 + \sum g_{ik}^{\max} \hat{p}_i(\tau) \theta_i(\tau) + \sum g_{lk}^{\max} p_l(\tau) \theta_l(\tau)} \geq \beta$, 其中 $l \neq i$ 。如果 l_i 使用的功率 $p_i(\tau)$ 比 $\hat{p}_i(\tau)$ 大, 那么 SINR 为:

$$\gamma_j(\tau)' = \frac{g_{jk}^{\min} p_j(\tau) \theta_j(\tau)}{N_0 + \sum g_{ik}^{\max} p_i(\tau) \theta_i(\tau) + \sum g_{lk}^{\max} p_l(\tau) \theta_l(\tau)} < \gamma_j(\tau)。$$

注意到当 $p_i(\tau) > \hat{p}_i(\tau)$, $\gamma_j(\tau)'$ 可能比 β 小, 则 l_j 和 l_i 不能同时传输; 即使 $\gamma_j(\tau)'$ 不比 β 小, 有 $\gamma_j(\tau)' < \gamma_j(\tau)$, 最优结果也不会比 l_i 使用功率 $\hat{p}_i(\tau)$ 好。所以综上所述, 当 $p_i(\tau) = \hat{p}_i(\tau)$ 可使得整体方案达到最优。

接下来讨论变量 $\theta_i(\tau)$ 。首先引入定义 1。

定义 1 在同一个时间片内, 通过 SIC 算法, 所有可以同时传输的机车构成的集合称为 SIC 集合。

注意到在式 (13) 中, 若通过 $\gamma_i(\tau) \geq \beta$ 的约束条件找到一个时间段里所有的 SIC 集合, 若为每个集合分配一个时间片, 那么 $\theta_i(\tau)$ 就可以确定下来, 此时时间片的数量就是 SIC 集合的数量。因此, 可以给出一个基本的确定 $\theta_i(\tau)$ 的方法如下:

- 1) 在一个时间段里, 找到所有的 SIC 集合;
- 2) 对于每一个 SIC 集合, 分配一个时间片;
- 3) 根据被确定下来的 $\theta_i(\tau)$ 求解式 (13)。

然而, 该基本求解算法的复杂度太高。因为对于一个有 n 辆机车的井下通信网络, 所有的 SIC 集合总数为 $(2^n - 1)$, 求解的复杂度为 $O(2^n)$ 。为进一步缩小复杂度, 引入定理 2。

定理 2 设 α_{\max} 是使用 SIC 算法时, 在同一个时间片内可以和 AP 同时传输的最大机车数量, 则有 $\alpha_{\max} = 1 + \left\lfloor \log_{(1+\beta)} \frac{P}{\beta N_0} \right\rfloor$ 。

证明: 假设在时间片里有辆机车同时和 AP 进行通信, 且接收到的信号满足 $g_{1k}^{\min} P_1(\tau) < g_{2k}^{\min} P_2(\tau) < \dots < g_{\alpha k}^{\min} P_{\alpha}(\tau)$, 基于 SIC 算法和定理 1, 有:

$$\begin{aligned} g_{1k}^{\min} P_1(\tau) &= \beta N_0, \\ g_{2k}^{\min} P_2(\tau) &= \beta(N_0 + g_{1k}^{\max} P_1(\tau)) \geq \beta(N_0 + g_{1k}^{\min} P_1(\tau)) = \beta(1 + \beta)N_0, \\ g_{3k}^{\min} P_3(\tau) &= \beta(N_0 + g_{1k}^{\max} P_1(\tau) + g_{2k}^{\max} P_2(\tau)) \geq \beta(1 + \beta)^2 N_0, \dots, \\ g_{\alpha k}^{\min} P_{\alpha}(\tau) &\geq \beta(1 + \beta)^{\alpha-1} N_0. \end{aligned}$$

所以有 $\alpha \leq 1 + \log_{(1+\beta)} \frac{g_{\alpha k}^{\min} P_{\alpha}(\tau)}{\beta N_0}$ 。因为 $g_{\alpha k}^{\min} =$

$$\min \{ |x_{\alpha k}^{\max}|^{-\lambda}, 1 \} \leq 1, P_{\alpha}(\tau) \leq P, \text{ 所以 } \alpha \leq \alpha_{\max} = 1 + \left\lfloor \log_{(1+\beta)} \frac{P}{\beta N_0} \right\rfloor。$$

由于 α_{\max} 比 n 小很多, 这意味着所有的 SIC 集合数量是 $\sum_{k=1}^{\alpha_{\max}} C(n, k)$ 而不是 $(2^n - 1)$ 。通过定理 2, 可以给出改进的求解算法如下:

- 1) 检查所有机车数量不超过 α_{\max} 的可行 SIC 集合;
 - 2) 对每一个可行 SIC 集合分配一个时间片;
 - 3) 根据被确定下来的 $\theta_i(\tau)$ 求解 (13)。
- 该方法的复杂度为 $O(n^{\alpha_{\max}})$ 。

3.2 最大 SIC 集合以及改进的优化策略

注意到 $n^{\alpha_{\max}}$ 依然是一个不小的数字, 为了进一步降低复杂度, 本节定义最大 SIC 集合的概念, 并且证明在求解时只需要考虑所有的最大 SIC 集合。

定理 3 对于两个 SIC 集合 A_1 和 A_2 , 如果 $A_2 \subset A_1$, 并且集合 $A_1 - A_2$ 中的机车比 A_2 中的机车距离 AP 更近, 那么, 有:

- 1) 在 A_1 的时间片里, 集合 $A_1 - A_2$ 中的机车发射信号, 在 A_2 的时间片里, 集合 $A_1 - A_2$ 中的机车不发射信号;
- 2) 无论在 A_1 还是 A_2 的时间片里, A_2 中的每辆机车都有相同的传输速率。

证明: 1) 的证明已在文献 [15] 中给出详细证明, 故略去。

在 SIC 算法里, 信号强的优先解码。因为集合 $A_1 - A_2$ 中的机车比 A_2 中的离 AP 更近, 所以集合 $A_1 - A_2$ 中的机车信号更强。因此, 在 A_1 的时间片里, 在解码 A_2 中的机车信号之前, $A_1 - A_2$ 中的机车信号都取消解码。从而, A_2 中机车的解码过程在 A_1 和 A_2 的时间片里是一样的, 都有相同的传输速率。所以 2) 得证。

从定理 3 的结果看来, 如果用 A_1 替代 A_2 , 显然这个新解决方案将有更低的复杂度。因此, 有如下定义。

定义 2 如果 $A_2 \subset A_1$, 并且集合 $A_1 - A_2$ 中的机车比 A_2 中的机车距离 AP 更近, 那么称 A_1 比 A_2 好。

定义 3 如果对于任意一辆机车 l 比 A 中所有机车距离 AP 的距离近, $A \cup \{l\}$ 都不是 SIC 集合, 则称 A 为最大 SIC 集合。

通过定理 3 和定义 3 可知, 如果一个集合不是最大 SIC 集合, 总能找到一个更好的 SIC 集合。因此, 在式 (13) 中只需要考虑最大 SIC 集合就能获得一个最优的解决方案。实际算法中, 可通过深度优先遍历算法去寻找所有最大 SIC 集合, 算法流程如图 2 所示。

尽管在最坏的情形下, 算法的复杂度和求解第 i 步 SIC 集合的复杂度一样, 但是在大多数情形下, 上述算法的复杂度是非常小的。而且, 最大 SIC 集合算法很大程度上减少了问题的规模 (只要考虑最大 SIC 集合)。

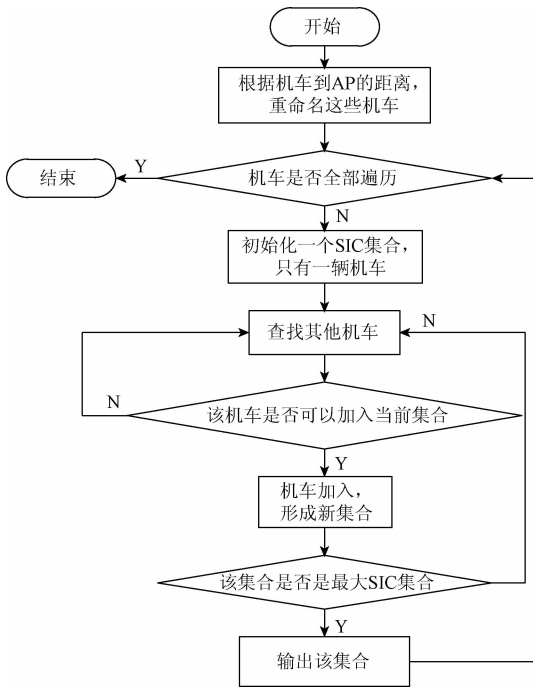


图2 算法流程

Fig. 2 Flow chart of algorithm

4 仿真结果

4.1 具体网络仿真

下面给出具体网络的仿真结果,并对结果进行分析。参数设置如下:阈值 $\beta = 3$, 衰减系数 $\lambda = 4$, 噪声干扰 $N_0 = 10^{-10}$ W, 功率 $P_{max} = 1$ W, $P_{min} = 0$ W, 带宽 $W = 22$ MHz, 平均车速 $v = 5$ m/s, 要求的最小数据传输速率为 $100 \text{ Kbps} \leq r_i \leq 1 \text{ Mbps}$, 时间片最大长度 $Y_{max} = 5$ s, 安全距离 $d_s = 30$ m。

考察一个有 20 辆机车的网络,表 1 是这 20 辆机车的发车时间(s),最小传输速率(Mbps)和机车行驶方向。

表 1 20 辆机车起始时间、最小传输速率和方向

Table 1 The start time, minimum transmission rate and direction of 20 locomotives

车号	发车时间	传输速率	方向	车号	发车时间	传输速率	方向
1	0	0.69	→	11	110	0.87	→
2	11	0.64	→	12	121	0.48	→
3	22	0.54	→	13	127	0.14	→
4	37	0.23	←	14	135	0.86	←
5	48	0.85	→	15	148	0.39	←
6	60	0.53	←	16	160	0.61	←
7	67	0.86	←	17	169	0.48	←
8	81	0.80	→	18	175	0.12	←
9	87	0.37	→	19	184	0.72	→
10	98	0.69	→	20	190	0.43	←

整个调度时间 $T = 238$ s;一共分成了 67 个时间段。图 3 是整个调度过程中时间段 $Y_1 \sim Y_{67}$ 每个时间段分别采取最大 SIC 集合算法,普通 SIC 方法以及不采取 SIC 方法下的 K 值。由图 3 可以看出,每个时间段里,采用最大 SIC 集合算法的 K 值均不低于普通 SIC 方法和不采取 SIC 方法的 K 值,大部分情况下,采用最大 SIC 集合算法的 K 值明显高于另外两种方法。

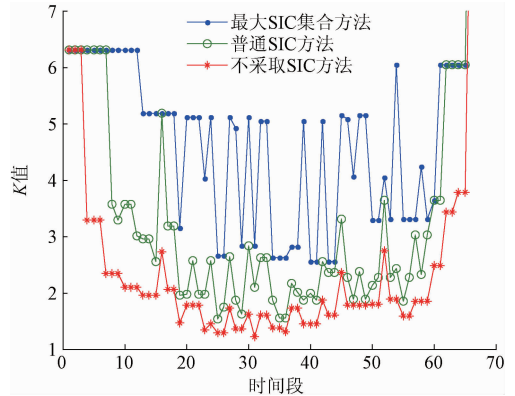


图3 各时间段 K 值

Fig. 3 K value of each segment

为了更好的展示传输的规律性和实际情况中机车的调度情况,截取时间段 $Y_{18} \sim Y_{20}$ 下分别采用最大 SIC 集合算法,普通 SIC 方法以及不采取 SIC 方法下的时间片划分方案,如图 4~6 所示。表 2 是时间段 $Y_{18} \sim Y_{20}$ 下采用最大 SIC 集合算法每个时间片里的最大 SIC 集合, (3, 0.03) 表示 3 号机车在该时间片里的通信功率为 0.03 W。结合图 4 和表 2 可以看出,3 个时间段的长度分别为 2、3 和 5 s,可以看到采用最大 SIC 集合算法下每个机车的发射时间和发射功率。例如, Y_{18} 起止时间分别是 65 和 67 s,分成两个时间片,第一个时间片长度大约是 1.2 s, 机车 3~6 分别以 0.03、0.02、0.39、0.01 W 的发射功率和基站通信,第二个时间片长度为 0.8 s,只有机车 4~6 和基站通信,机车 3 在这个时间片里不和基站通信。

作为比较,图 5 和 6 是相同时间段下的时间片划分方案,每个机车的发射功率固定。显然,机车采用最大 SIC 集合算法相比于另外两种方法具有更多的发送机会。

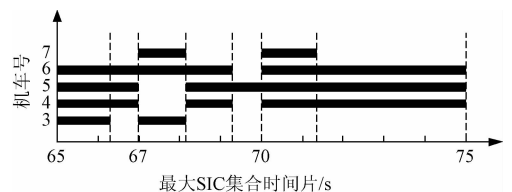


图 4 $Y_{18} \sim Y_{20}$ 下最大 SIC 集合时间片划分方案

Fig. 4 Maximum SIC set time slotscheme under the time between Y_{18} to Y_{20}

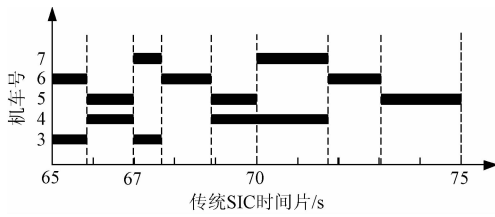


图 5 $Y_{18} \sim Y_{20}$ 下普通 SIC 集合时间片划分方案
Fig. 5 Ordinary SIC set time slotscheme under the time between Y_{18} to Y_{20}

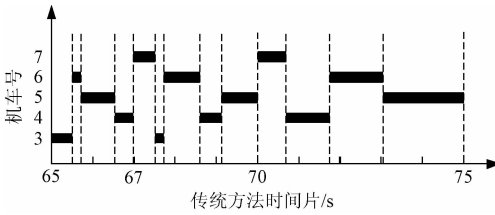


图 6 $Y_{18} \sim Y_{20}$ 下传统方法时间片划分方案
Fig. 4 Tradition method time slotscheme under the time between Y_{18} to Y_{20}

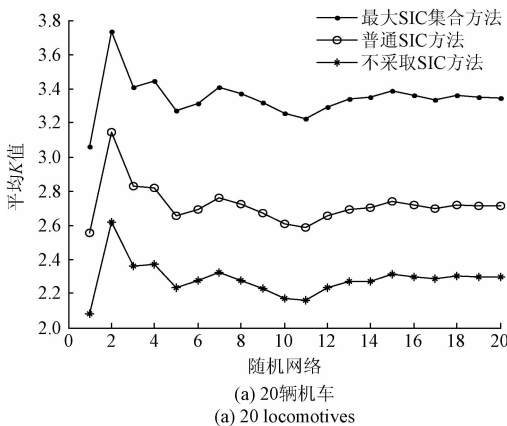
表 2 $Y_{18} \sim Y_{20}$ 下最大 SIC 集合

Table 2 Maximum SIC set under Y_{18} to Y_{20}

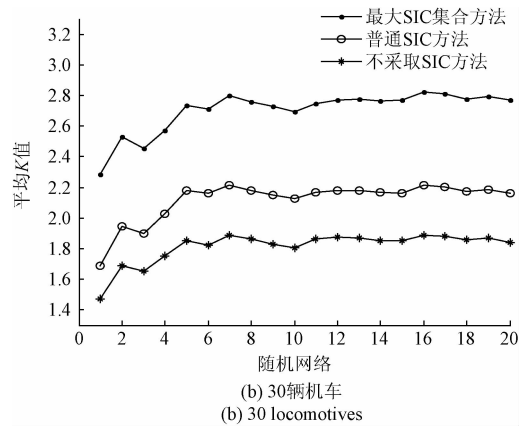
时间片	最大 SIC 集合 (机车号, 功率)
1	(3, 0.03), (6, 0.01), (5, 0.39), (4, 0.02)
2	(6, 0.01), (5, 0.1), (4, 0.01)
3	(7, 0.06), (3, 0.01), (6, 0.02)
4	(6, 0.01), (4, 0.24), (5, 0.25)
5	(5, 0.02)
6	(7, 0.04), (4, 0.01), (6, 0.11), (5, 0.46)
7	(4, 0.01), (6, 0.03), (5, 0.12)

4.2 更多仿真结果

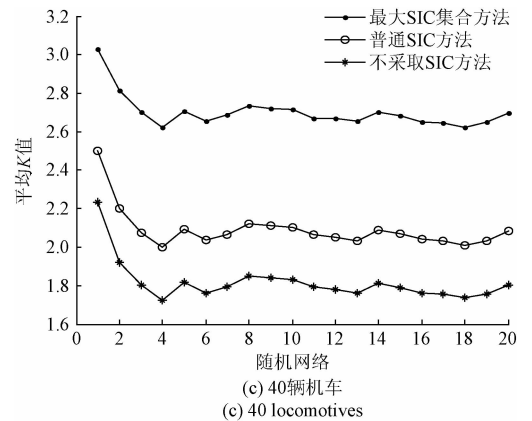
为了对算法性能进一步分析,改变机车数量由 20 到 50,并生成 20 个不同的随机网络实例,针对最大 SIC 集合算法,普通 SIC 方法和不采取 SIC 方法下的 K 值进行比较,如图 7 所示。表 3 是仿真数据,其中的 K 值是 20



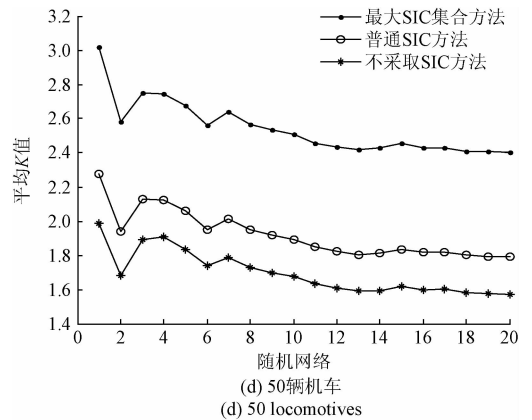
(a) 20 辆机车
(a) 20 locomotives



(b) 30 辆机车
(b) 30 locomotives



(c) 40 辆机车
(c) 40 locomotives



(d) 50 辆机车
(d) 50 locomotives

图 7 不同机车数量下 20 个随机网络实例的结果

Fig. 7 The results for the instances of 20 random networks under different locomotive number

表 3 不同机车数量下 20 个随机网络实例的平均 K 值及改进率

Table 3 Average K values and improvement rate for the instances of 20 random networks under different

	locomotive number			改进率 1/%	改进率 2/%
	最大 SIC 集合算法	普通 SIC 方法	不采取 SIC		
20 辆	3.35	2.72	2.28	23.1	46.5
30 辆	2.70	2.12	1.81	27.6	49.0
40 辆	2.70	2.09	1.82	29.2	48.7
50 辆	2.54	1.92	1.70	32.4	49.9
平均	2.82	2.21	1.90	28.1	48.6

个不同的随机网络实例的平均值,改进率1是最大SIC集合方法相对于普通SIC方法的改进率,改进率2是最大SIC集合方法相对于不采取SIC方法的改进率。对所有不同方法下的 K 值取平均值可知采用最大SIC集合算法比普通SIC方法的 K 值提高了28.1%,比不采取SIC方法的 K 值提高了48.6%。

5 结 论

针对矿井机车移动通信过程,建立一种基于SIC的动态功率调度模型,并通过提出SIC集合概念和最大SIC集合算法,有效的降低求解问题的复杂度。仿真显示,相对于传统方法和普通SIC方法,最大SIC集合方法有了较大的改进。

本文建立的模型是针对井下单AP双直道单跳网络。如何改进本文方法使其适用于更复杂的井下网络环境,如:单AP多轨混合道,多AP多轨混合道等将是下一步的研究方向和重点。

参考文献

- [1] 吴燎原,韩江洪,卫星,等. 面向矿井机车的干扰管理移动网络调度策略[J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(12):1813-1820.
WU L Y, HAN J H, WEI X, et al. Scheduling strategy for the mine locomotive wireless mobile networks based on interference management [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (12): 1813-1820.
- [2] NGO D T, LE L B, LE N T, et al. Distributed interference management in two-tier CDMA femtocell networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 979-989.
- [3] 李建东,李钊. 干扰管理——提升无线通信网络性能的核心技术[J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(3): 40-43.
LI J D, LI ZH. Interference management: The key to improving wireless network performance [J]. ZTE Technology Journal, 2013, 19(3): 40-43.
- [4] FENG H, LIU K J R. A multiuser TRDMA uplink system with 2D parallel interference cancellation [J]. IEEE Transaction on Communication, 2014, 62(3): 1011-1022.
- [5] MIRIDAKIS N I, VERGADOS D. A survey on the successive interference cancellation performance for single-antenna and multiple-antenna OFDM systems [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(1): 312-315.
- [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] 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.
- [8] 王恒,李敏,刘其琛,等. 一种基于确定性调度的工业无线网络路由算法 [J]. 仪器仪表学报,2011, 32(9): 1921-1928.
WANG H, LI M, LIU Q CH, et al. Routing algorithm for industrial wireless network based on deterministic scheduling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9):1921-1928.
- [9] 何明,陈秋丽,陈希亮,等. 鱼群启发的三维 Ad hoc 网络节点随机移动优化模型 [J]. 仪器仪表学报,2014, 35(12):2826-2834.
HE M, CHEN Q L, CHEN X L, et al. Fish swarm inspired Ad hoc networks node random mobility optimization model in 3D environment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (12): 2826-2834.
- [10] 赵海涛,朱洪波,刘南杰,等. 无线多媒体 Mesh 网络容量感知路由优化研究 [J]. 仪器仪表学报,2013, 34(6):2-9.
ZHAO H T, ZHU H B, LIU N J, et al. Research on capacity-aware routing optimization for wireless multimedia meshnetwork [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6):2-9.
- [11] 石雷,韩江洪,石怡,等. 无线多跳网络下基于干扰管理的高容量跨层优化策略 [J]. 通信学报,2014, 35(12):89-97.
SHI L, HAN J H, SHI Y, et al. High capacity cross layer optimization strategy for multi-hop wireless network with interference management [J]. Journal on Communications, 2014, 35(12):89-97.
- [12] 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.

- [13] SHI L, SHI Y, YE Y, et al. An efficient interference management framework for multi-hop wireless networks [C]. IEEE WCNC, 2013: 1129-1134.
- [14] 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.
- [15] 石雷, 韩江洪, 魏振春. 多包接收无线传感器网络的跨层优化策略研究[J]. 电信科学, 2011, 27(3): 47-53.
SHI L, HAN J H, WEI ZH CH. Maximizing throughput for wireless sensor network with multi-packet reception[J]. Telecommunications Science, 2011, 27(3): 47-53.

作者简介



石雷, 1980 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院讲师, 博士。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, Ph. D., lecturer in School of Computer and Information,

Hefei University of Technology. His present research interests include design and optimization of wireless network algorithm.



高宇, 1992 年出生, 合肥工业大学计算机与信息学院硕士研究生。主要研究方向为无线网络算法优化。

E-mail: 2415936192@qq.com

Gao Yu was born in 1992, M. Sc. candidate in School of Computer and Information, Hefei University of Technology. His present research interest is optimization of wireless network algorithm.



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 interest is design and optimization of wireless network algorithm and streaming technologies.