

基于滚动窗口的 WCDMA 无线网络规划

张宏远¹ 席裕庚¹ 谷寒雨¹

摘要 借鉴滚动窗口优化的基本原理,研究了大规模 WCDMA 无线网络基站规划问题.提出了基于滚动窗口的 WCDMA 无线网络基站滚动规划方法,把原优化问题的整体求解分散在滚动窗口内进行,设计了二维空间内的滚动策略,同时对 WCDMA 网络中的相互干扰滚动预测,证明了这种基于滚动窗口的规划方法能够保证全局优化目标单调下降.通过对不同滚动策略的仿真计算,说明了滚动策略设计对二维空间内滚动窗口优化的重要性.

关键词 WCDMA 无线网络, 基站规划, 滚动规划, 滚动策略
中图分类号 TN929.5

Planning WCDMA Wireless Networks Using Rolling Window

ZHANG Hong-Yuan¹, Xi Yu-Geng¹, Gu Han-Yu¹

Abstract The large scale optimization problem of WCDMA wireless networks base station planning is studied by means of the basic principle of rolling window optimization. A WCDMA base station planning method based on rolling windows is presented, where the global optimization problem is decomposed into small scale optimization problems in rolling windows. An effective shifting strategy is designed to move the windows in two-dimensional space, and the inter-interference in WCDMA networks is predicted for each rolling window. It is proved that our method keeps the global objective of the original problem non-increasing during optimization. In simulation, three different shifting strategies are tested, and the results are analyzed. This paper shows the importance of shifting strategy for rolling windows in two-dimensional space.

Key words WCDMA wireless networks, base station planning, rolling planning, rolling strategy

1 引言

在 WCDMA 网络中,所有用户占用相同频段与相同时间,从而使得 WCDMA 无线网络构成一个自干扰系统.在进行无线网络基站规划时,必须综合考虑覆盖、容量及质量等各方面因素.文 [1,2] 对该类问题的数学模型及复杂性进行了研究,并证明其为 NP-HARD. 这种问题的优化方法主要集中在近似算法,如遗传算法、模拟退火、禁忌搜索等方面 [2~4].

在求解大规模优化问题的各种方法中,滚动窗口优化是一种十分有效的启发式分解协调方法,其主要思想是用不断移动的滚动窗口内小规模局部问题的求解来取代大规模整体问题的求解,以此克服大规模问题的计算复杂性.早在运筹

学领域的生产调度问题研究中,文 [5] 就已提出了滚动调度的策略;而在离散事件系统的研究中,文 [6] 提出的有限前瞻策略 (Limited lookahead policy, LLP),也是一种滚动策略.在上世纪 70 年代出现的模型预测控制,又称滚动时域控制是在控制领域内应用滚动窗口优化的典范,它以预测模型、滚动优化及反馈校正为特征,不仅以滚动窗口优化减少了在线计算量,而且结合反馈校正有效地克服不确定性的影响 [7]. 近年来,以滚动优化为核心的预测控制原理又被推广到机器人路径规划 [8],生产作业计划和资源调度等优化问题.呈现出滚动窗口方法在求解复杂优化问题时的巨大潜力.综观这些不同领域内的滚动窗口优化方法,它们都具有以下特点:一是在滚动的时间或空间窗口内对局部问题进行优化,二是通过窗口的滚动考虑和修正全局问题的解. WCDMA 无线网络基站规划是一个静态大规模优化问题,在上行链路中,每个用户的无线连接都对其他用户的通信造成干扰,相邻基站的规划结果更是严重耦合.采用简单的静态空间分解把原问题分解为多个子问题虽然可以减少计算规模,但相邻子问题规划结果的耦合关系难以处理.因此,本文将研究滚动窗口优化方法在 WCDMA 无线网络基站规划中的应用.

2 WCDMA 基站规划问题描述

为了清楚地描述 WCDMA 的网络基站布局规划问题,首先给出以下符号定义:

CS , 候选基站集合 $CS=\{j=1, 2, \dots, N\}$;

TS , 测试点集合 $TS=\{i=1, 2, \dots, M\}$;

x_{ij} , 0-1 变量,如果测试点 i 由基站 j 服务,则 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$;

y_j , 0-1 变量,如果在 j 处建基站,则 $y_j = 1$, 否则 $y_j = 0$;

C_{ij} , 测试点 i 到基站 j 的无线信号传播损耗; C_j , 基站 j 的造价,包括土地使用费、设备及维护费;

U_i , 测试点 i 的通话量统计值,单位: Erl;

SF , WCDMA 系统的扩频因子,为传输信道频带宽度与信号速率的比值.

参照文献 [1],给出 WCDMA 的网络基站布局规划问题的整数规划模型如下

$$\min Z = \sum_{j \in CS} C_j y_j + \lambda \sum_{i \in CS} \sum_{j \in TS} U_i C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in CS} x_{ij} = 1, \quad i \in TS \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad i \in TS, j \in CS \quad (3)$$

$$\frac{SF}{\sum_{t \in CS} \sum_{i \in TS} U_i x_{it} C_{it} / C_{ij} - 1} \geq SIR_{\min} * y_j, \quad j \in CS \quad (4)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\}, \quad i \in TS, j \in CS \quad (5)$$

其中优化目标 (1) 为基站总造价和所有移动用户功率消耗的加权和. (2) 式表示每个测试点的用户唯一地接入一个基站. (3) 式表示一个测试点能接入一个基站覆盖的前提是该基站被选择建设. (4) 式表示每个基站上行链路的信噪比 SIR (Signal interference ratio) 要保持在一一定的水平之上,以保证一定的网络通信质量. 该模型为 WCDMA 无线网络区域内基站的全局规划模型,记为 $P(CS, TS)$,解记为 (\bar{Y}, \bar{X}) . 下文将研究 $P(CS, TS)$ 基于滚动窗口的优化方法.

收稿日期 2005-6-13 收修改稿日期 2006-9-12
Received June 13, 2005; in revised form September 12, 2006
国家自然科学基金 (60274013, 60474002) 和上海市科技发展基金 (04DZ11008) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of P.R.China (60274013, 60474002) and Shanghai Development Found for Science and Technology (04DZ11008)
1. 上海交通大学自动化研究所 上海 200240
1. Institute of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240
DOI: 10.1360/aas-007-0432

3 基于滚动窗口的基站规划

自由空间中电波信号的传播损耗与传播距离的平方成正比, 因此来自较远距离的干扰信号对信噪比的影响很小. 如果我们把全局基站规划问题静态地划分为多个局部区域的基站规划子问题, 则对每一个局部区域来说, 虽然远处区域的规划结果对其影响甚微, 但相邻区域的规划结果对其影响较大. 显然这种静态的分解方法不能很好地处理相邻区域的耦合关系. 因此我们选择一定的局部区域作为滚动窗口, 设计基于滚动窗口的优化方法, 一方面在滚动窗口内规划时粗略估计窗口外基站规划结果的影响, 另一方面随着窗口滚动推进, 可依次考虑相邻基站规划结果的相互影响, 逐步改善全局的规划结果

3.1 滚动窗口子问题

在对处于平面空间的 WCDMA 基站进行滚动规划时, 优化目标是网络中的基站造价与所有移动台发射功率的加权合, 滚动窗口的移动没有明确的方向, 但是滚动窗口功能是明确的, 即通过滚动窗口内子问题的优化求解改善全局问题的性能指标. 图 1 为 WCDMA 基站滚动规划的滚动窗口示意图. 我们首先任意选择一个局部区域为初始滚动窗口, 然后开始滚动优化. 在每一步滚动规划中, 由一组候选基站及相应的测试点集合组成当前滚动窗口 (实线所示), 当滚动窗口内的基站经过优化后, 优化窗口向邻近区域滚动, 基站 A 及相应的测试点被移出当前窗口, 而基站 B、C 及相应的测试点纳入新窗口 (虚线所示). 不属于滚动窗口的其他规划区域称为预测窗口. 为了简化滚动窗口的描述, 假设基站与测试点之间存在一定关联, 这种关系由基站与测试点之间的覆盖关系确定. 由于任何覆盖关系都可以用 $P(CS, TS)$ 的一个可行解表示, 因此我们给出如下定义:

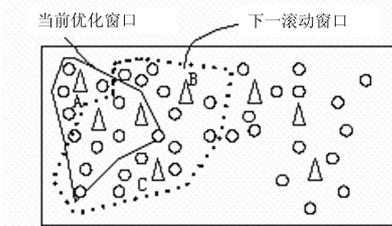


图 1 基站的滚动窗口优化示意图

Fig. 1 Sketch map of the rolling window

定义 1. 全局问题 $P(CS, TS)$ 的每一组解 (\bar{Y}, \bar{X}) , $\bar{Y} = \{\bar{y}_j : j \in CS\}$, $\bar{X} = \{\bar{x}_{it} : i \in TS, j \in CS\}$, 确定了当前基站与测试点的一种覆盖关系, 这种关系称为 WCDMA 基站滚动规划的当前状态, 简称状态.

定义 2. 滚动窗口 (TS^T, CS^T) 为包含测试点 TS^T 和候选基站 CS^T 的区域.

定义 3. 预测窗口 (CS^P, TS^P) 为不包含测试点 TS^T 和候选基站 CS^T 的其他区域. 预测窗口内的基站 j 受到预测窗口内用户的干扰为

$$I_j = \sum_{t \in CS^P} \sum_{i \in TS^P} U_i \bar{x}_{it} C_{it} / C_{ij} - 1, \quad j \in CS^P \quad (6)$$

滚动窗口内的基站 j 受到来自预测窗口内用户的干扰为

$$I'_j = \sum_{t \in CS^P} \sum_{i \in TS^P} U_i \bar{x}_{it} C_{it} / C_{ij}, \quad j \in CS^T \quad (7)$$

滚动窗口子问题 $SP(TS^T, CS^T)$ 为

$$\min ZT = \sum_{j \in CS^T} C_j y_j + \lambda \sum_{i \in TS^T} \sum_{j \in CS^T} U_i C_{ij} x_{ij} \quad (8)$$

s.t.

$$x_{ij} \leq y_j, \quad i \in TS^T, j \in CS^T \quad (9)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad i \in TS^T, j \in CS^T \quad (10)$$

$$\frac{SF}{\sum_{t \in CS^T} \sum_{i \in TS^T} U_i x_{it} C_{it} / C_{ij} + I'_j - 1} \geq SIR_{\min} * y_j, \quad j \in CS^T \quad (11)$$

$$\frac{SF}{\sum_{t \in CS^T} \sum_{i \in TS^T} U_i x_{it} C_{it} / C_{ij} + I_j} \geq SIR_{\min} * \bar{y}_j, \quad j \in CS^P \quad (12)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\}, \quad i \in TS^T, j \in CS^T \quad (13)$$

其中 I'_j 和 I_j 在每次滚动规划前由公式 (6)(7) 计算, \bar{y}_j 为状态预测值. (11) 式要求在考虑预测窗口干扰的情况下, 滚动窗口内的基站 j 如果被选择, 则其上行链路的信噪比不小于 SIR_{\min} . (12) 式要求滚动窗口内的基站规划也要保证预测窗口的被选择基站的信噪比不小于 SIR_{\min} . 虽然该问题的求解在理论上是 NP-HARD, 但当问题规模较小时, 不难用通常的优化算法求解, 在此不再讨论.

3.2 滚动规划的算法框架及单调性证明

这里仅给出 WCDMA 无线网络基站的滚动规划方法的一般性算法框架.

Step 1. 给定最大滚动次数 MK , 令 $K = 0$, 任意选择初始可行解 (\bar{Y}, \bar{X}) 为初始状态, 任意选择相邻的几个候选基站及其覆盖的测试点组成滚动窗口 (TS^T, CS^T) ;

Step 2. 根据公式 (6)、(7) 估算预测干扰 I'_j 和 I_j ;

Step 3. 求解滚动窗口优化问题 $SP(TS^T, CS^T)$;

Step 4. 根据子问题的解更新全局问题 PTS, CS 的解 (\bar{Y}, \bar{X}) ;

Step 5. 如果 $K \geq MK$, 滚动规划结束, 否则, 根据滚动策略滚动优化窗口, 刷新滚动窗口 (TS^T, CS^T) 及预测窗口 (TS^P, CS^P) , $K = K + 1$, 转 Step 2. 记第 K 次滚动优化后全局问题的性能指标为 ZK , 则可以得到以下定理.

定理 1. 经过第 $K + 1$ 次滚动窗口优化后, $Z^{K+1} \leq Z^K$

证明. 第 K 次滚动规划后, 得到全局问题的解为 (\bar{Y}, \bar{X}) , 这也是第 $K + 1$ 次滚动规划前的解状态. 此时的全局性能指标为:

$$Z^K = \sum_{j \in CS} C_j \bar{y}_j + \lambda \sum_{i \in CS} \sum_{j \in TS} U_i C_{ij} \bar{x}_{ij}$$

经过滚动窗口的第 $K + 1$ 次滚动, 我们得到新的滚动窗口 (TS^T, CS^T) , 及预测窗口 (CS^P, TS^P) . 由于此时的解状态并没有改变, 故当前全局性能指标可以表示为

$$Z^K = ZT^{K+1} + ZP^{K+1}$$

其中

$$ZT^{K+1} = \sum_{j \in CS^T} C_j \bar{y}_j + \lambda \sum_{i \in CS^T} \sum_{j \in TS^T} U_i C_{ij} \bar{x}_{ij}$$

$$ZP^{K+1} = \sum_{j \in CS^P} C_j \bar{y}_j + \lambda \sum_{i \in CS^P} \sum_{j \in TS^P} U_i C_{ij} \bar{x}_{ij}$$

分别对应第 $K+1$ 次滚动窗口和预测窗口的性能指标. 经过第 $K+1$ 次滚动窗口内规划问题优化得到滚动窗口子问题的最优解 ZT^{K+1*} , 则显然

$$ZT^{K+1*} \leq ZT^{K+1}$$

根据滚动窗口内子问题的定义, 滚动窗口内子问题的优化求解并不影响预测窗口内基站规划的结果, 即 $ZP^{K+1*} = ZP^{K+1}$. 而且滚动窗口子问题的优化不会破坏全局解的可行性, 因此在第 $K+1$ 次滚动规划后全局问题的性能指标为

$$Z^{K+1} = ZT^{K+1*} + ZP^{K+1*} \leq ZT^{K+1} + ZT^{K+1} = Z^K$$

□

4 计算仿真

为了检验 WCDMA 基站规划的滚动规划算法, 本文进行了计算仿真. 滚动窗口子问题的优化求解利用了数学规划软件包 GLPK¹, 计算数据来源于 Dipartimento di Elettronica e Informazione (DEI)². 仿真计算中, 候选基站数目 $N = 45$, 测试点数目 $M = 881$, 令 $SF = 128$, $SIR_{min} = 6\text{dB}$, $\lambda = 1$, 候选基站的造价 C_j 取随机值, 所有测试点的业务量 $U_i = 0.33$. 所有计算在 512M 内存的 PIV 计算机上完成.

为了检验滚动算法的性能, 结合上文的算法框架设计了一个简单的滚动策略. 先对所有候选站址用 TSP 算法建立最短回路, 在回路上滚动窗口, 窗口内的候选基站数量固定为 8 个. 滚动时, 窗口内的基站先入先出. 图 2 为在该滚动策略控制下优化目标的变化曲线. NBS 为需要建设的基站数量, SIR_M 为最大的链路干扰, Z 为优化性能指标. 仿真结果说明, 基站规划的滚动规划是单调下降的, 而且随着滚动窗口的不断移动, 优化结果逐渐趋于稳定. 这也说明滚动窗口的移动应该有一个合理的迭代次数, 以有利于节省计算时间.

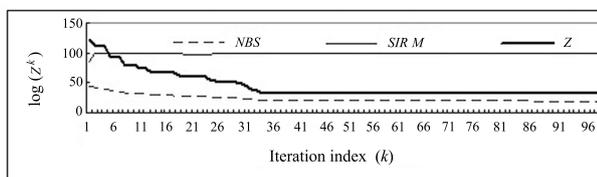


图 1 滚动窗口规划的仿真结果
Fig. 1 Simulation result of rolling planning

5 总结

为了减少 WCDMA 无线网络基站规划问题的求解难度, 本文借鉴滚动优化的一般原理, 提出了滚动规划方法. 在合理设计滚动窗口内优化子问题的前提下, 证明了这种基于滚动窗口的规划方法能够保证整体优化目标单调下降. 文中针

¹Andrew Makhorin. GLPK (GNU Linear Programming Kit). <ftp://ftp.gun.org/glpk/glpk.4.4>, Dec, 2005

²E. Amaldi, Optimization Problem in UMTS Network Planning. <http://www.elet.polimit.it/3Gplanningsoftware.html>, Sep, 2004

对问题特点, 设计了在二维空间内的滚动策略. 仿真计算说明, 滚动策略的合理设计对此类问题求解有重要作用. 本文的基于滚动窗口的基站规划方法只是一般的框架性描述, 在状态预测方法、滚动策略及子问题优化算法等多方面有待于进一步的研究.

References

- 1 Edoardo Amaldi, Antonio Capone, Federico Malucelli. Planning UMTS base station location: optimization models with power control and algorithms. *IEEE Transactions on Wireless Communication*. 2003, **2**(5): 939~952
- 2 Matthias Galota, Christian Glaßer, Steffen Reith, Heribert Vollmer. A polynomial-time approximation scheme for base station positioning in UMTS networks. In: Proceedings of the 5th International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications. 2001. 52~59
- 3 Molina A, Athanasiadou G E, Nix A R. The automatic location of base-stations for optimized cellular coverage: a new combinatorial approach. In: Proceedings of IEEE 49th Vehicular Technology Conference. 1999, **1**: 606~610
- 4 Tutschku K, Leibnitz K, Phuoc Tran-Gia. ICEPT - An integrated cellular network planning tool. In: Proceedings of IEEE 47th Vehicular Technology Conference. 1997, **2**: 765~769
- 5 Ovacik I M, Uzsoy R. Rolling horizon algorithms for a single-machine dynamic scheduling problem with sequence-dependent setup times. *International Journal of Production Research*. 1994, **32**(6): 1243~1263
- 6 Chung S L, Lafortune S, Lin F. Limited lookahead policies in supervisory control of discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1992, **37**(12): 1921~1935
- 7 Xi Yu-Geng, Geng Xiao-Jun, Chen Hong. Recent advances in research on predictive control performance. *Control Theory and Applications*, 2000, **17**(4): 469~475
(席裕庚, 耿晓军, 陈虹. 预测控制性能研究的新进展. 控制理论与应用, 2000年, **17**(4), 469~475)
- 8 Zhang Chun-Gang, Xi Yu-Geng. Robot path planning in unknown global environment based on rolling window. *Science In China (series E)*, 2001, **31**(1): 51~59
(张纯刚, 席裕庚. 全局环境未知时基于滚动窗口的机器人路径规划. 中国科学 E 辑, 2001, **31**(1): 51~59)

张宏远 上海交通大学博士, 研究方向为复杂系统控制及通信网络规划. 本文通信作者. E-mail: fly_iris@yahoo.com.cn

(ZHANG Hong-Yuan Ph.D. candidate at the Institute of Automation, in Shanghai Jiao Tong University. His research interest covers complicated system control and network planning. Corresponding author of this paper.)

席裕庚 上海交通大学教授, 1984 年从德国慕尼黑大学获得博士学位, 主要研究方向为预测控制、复杂大系统及智能机器人. E-mail: ygxi@sjtu.edu.cn

(XI Yu-Geng Ph.D., professor of Shanghai Jiao Tong University. Received his Ph.D. degree from Technical University of Munich, Germany in 1984. His research interest covers predictive control, large scale system, and intelligent robotics.)

谷寒雨 上海交通大学副教授, 研究方向为生产调度理论、方法及应用, 组合优化算法及应用. E-mail: guhy@sjtu.edu.cn

(GU Han-Yu Associated professor of Shanghai Jiao Tong University. His research interest covers production scheduling theory, methodology and application, combinational optimization algorithm and application.)