

文章编号:1001-5132 (2009) 04-0449-05

一种 WiMAX 上行可变步长功率的控制算法

李佳树^{1,2}, 何加铭^{1,2*}, 张青波^{1,2}, 黄 珊^{1,2}

(1.宁波大学 通信技术研究所, 浙江 宁波 315211; 2.宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 功率控制技术是无线通信系统需实现的关键技术, 根据 IEEE802.16 协议要求和 WiMAX 系统同频干扰特性, WiMAX 系统上行链路需要一种合理的功率控制算法. 因此, 通过改进传统闭环功率控制算法, 使得算法中功率控制步长可根据上行链路信道质量而改变, 并由此得到一种应用于 WiMAX 系统上行链路的可变步长功率控制算法. 最后通过仿真对比得到算法收敛因子的合理取值, 验证了可变步长功率控制算法可有效提高功率控制精度和收敛速度.

关键词: WiMAX; 上行链路; 功率控制; 可变步长; 收敛因子

中图分类号: TN925.93

文献标识码: A

发射功率作为重要的无线资源为所有用户共享, 一个合理有效的功率控制方案是实现整个通信系统高容量和高质量的关键, 其目标是抑制同频干扰, 确保通信质量. 从第一代蜂窝通信系统开始功率控制技术已被广泛地研究, Zander 提出了分布式功率控制的思想^[1], 随后 Foschini 等人提出分布式功率控制更通用更实际的算法^[2], Yate 提出了上行功率控制算法的具体构架及满足的性质^[3-4]. 作为第三代无线通信系统的 WiMAX 同样需要采用功率控制, IEEE802.16 协议虽然建议在 WiMAX 系统上行链路中采用功率控制技术, 并规范了其性能, 但并未明确功率控制具体算法^[5]. 在上行闭环功率控制中, 相对于固定步长功率控制算法, 可变步长功率控制算法能有效提高功率控制的精度和收敛速度^[6]. 通过改进传统闭环固定步长功率控制算法, 笔者提出了一种适用于 WiMAX 系统上行

链路的可变步长功率控制算法.

1 WiMAX 上行链路同频干扰分析

由于频谱资源的限制, 相同频率的子信道在系统上行链路中被重复使用, 从而引起同频干扰. 而 WiMAX 系统中同样存在同频干扰的问题, 由于 OFDM 正交频分技术的引入, 蜂窝小区内的同频干扰得到避免, 而各小区间的同频干扰成为系统上行链路的主要干扰^[7]. 如图 1 所示, 在蜂窝小区 $cell_i$ 和 $cell_j$ 中, 用户站 SS_i 和 SS_j 分别与各自小区内

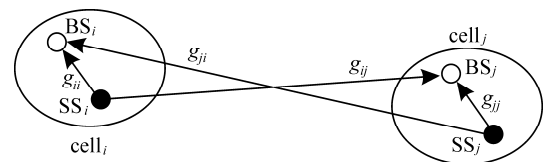


图 1 小区间同频干扰模型

收稿日期: 2009-02-27.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 科技部国际技术合作与交流项目(2009DFA12120); 国家自然科学基金(60671037); 宁波市工业攻关项目(2007B10051).

第一作者: 李佳树(1981-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: WiMAX 无线通信系统. E-mail: lijiaoshu@gmail.com

*通讯作者: 何加铭(1949-), 男, 浙江杭州人, 博士/教授, 主要研究方向: 无线通信. E-mail: hejiaming@nbu.edu.cn

的基站 BS_i 和 BS_j 进行上行通信. 由于 SS_i 和 SS_j 都采用了相同的上行子信道 L , 导致 SS_j 上行信号在被 BS_j 接收的同时也形成对 SS_i 上行链路的干扰.

采用链路信号干扰噪声比作为同频干扰下衡量上行链路信道质量的标准, 其中 SS_i 上行链路 $SINR$ 值的表达式如下:

$$\begin{aligned} SINR &= p_i g_i / IN_i, \\ IN_i &= \sum_{j=1, j \neq i}^N p_j g_{ji} + n_o, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, N 为同频信道小区数量; p_i 为 SS_i 的上行发射功率; g_i 为 SS_i 的上行链路损耗; g_{ji} 为 SS_j 到 BS_i 的上行链路损耗; IN_i 为 SS_i 的上行链路同频干扰与噪声 N_o 之和. 通过对 WiMAX 系统同频干扰模型研究可得: 当系统中某个用户站提高其上行发射功率, 势必会增加其他用户站的上行链路干扰, 进而造成其他用户站为了维持其正常通信而提高上行发射功率, 从而引起同频干扰的恶性循环. 因此需要在 WiMAX 上行链路中引入功率控制技术, 控制各用户站的上行发射功率.

2 WiMAX 上行功率控制算法

目前, 无线通信系统上行链路功率控制主要采用闭环功率控制的方法. 上行闭环功率控制是指小区中基站根据与用户站之间的上行链路信道质量是否满足目标质量而产生功率控制信息, 并下行发送给用户站, 用户站根据接收到的功率控制信息改变其上行发射功率. 其中功率控制信息包括功率控制指令和功率控制步长, 前者决定功率增加或者减少的方向, 后者决定功率增加或者减少的大小. 根据功率控制步长的可变性, 闭环功率控制可分为固定步长功率控制和可变步长功率控制.

2.1 传统的闭环功率控制算法

在 IS-95 系统上行链路中, 由于带宽资源的紧张, 往往采用固定步长功率控制算法^[8], 其功率控

制指令只需要 1 bit 带宽. 固定步长功率控制算法表达式如下:

$$\begin{aligned} p^{(n+1)} &= p^{(n)} + \Delta p C(SINR^{(n)} - \gamma_0), \\ C(SINR^{(n)} - \gamma_0) &= \begin{cases} 1 & SINR^{(n)} < \gamma_0, \\ 0 & SINR^{(n)} = \gamma_0, \\ -1 & SINR^{(n)} > \gamma_0, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $SINR^{(n)}$ 为上行链路当前 $SINR$ 值; γ_0 为上行链路需要实现的目标 $SINR$ 值; $C(SINR^{(n)} - \gamma_0)$ 为功率控制命令; Δp 为功率控制步长, dB; $p^{(n)}$ 为当前用户站上行发射功率, dBm; $p^{(n+1)}$ 为下一时刻经过功率控制调整后用户站的上行发射功率. 由于功率控制步长固定, 若将 Δp 设置为较小的值, 则当上行链路的 $SINR^{(n)}$ 值与目标值 γ_0 相差较大时, Δp 值因为过小而无法迅速改变上行发射功率, 造成算法迭代次数增加、功率控制过程变慢、系统负荷变大的情况发生; 若将 Δp 设置为较大的值, 则当上行链路 $SINR^{(n)}$ 与目标 γ_0 比较接近时, 由于控制精度不够造成 $SINR^{(n)}$ 在 γ_0 左右震荡而无法收敛. 因此, 在上行带宽资源允许的情况下, 需采用可变步长功率控制.

2.2 WiMAX 可变步长功率控制算法

WiMAX 系统充足的通信带宽和 IEEE802.16 协议完善的通信帧消息格式, 给可变步长功率控制算法的实现提供了保障. 将固定步长功率控制算法表达式改为乘积因子的形式, 其中上行发射功率的单位为 W.

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} \varphi, \Delta p > 1, \varphi = \Delta p^{C(SINR^{(n)} - \gamma_0)}, \quad (3)$$

其中, φ 表示功率控制信息, 它包括了功率控制指令和功率控制步长. 考虑寻找 1 个以 $SINR^{(n)}$ 为参量的 φ 表达式, 使它能满足的以下关系:

- (1) 当 $SINR^{(n)}$ 与 γ_0 相差较大时, φ 相对增大;
- (2) 当 $SINR^{(n)}$ 与 γ_0 相差较小时, φ 相对减少;
- (3) φ 具有方向性, 能反映 $SINR^{(n)}$ 与 γ_0 间的大小关系.

其中, 关系(1)和关系(2)可以实现功率控制步长随当前上行链路的 $SINR$ 值而变化, 关系(3)可以

实现功率控制指令的变化. 根据以上性质, φ 的表达式可表示如下:

$$\varphi = (\gamma_0 / SINR^{(n)})^\omega, 0 < \omega \leq 1. \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式, 得到 WiMAX 系统上行链路可变步长功率控制算法.

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} (\gamma_0 / SINR^{(n)})^\omega, 0 < \omega \leq 1, \quad (5)$$

其中, ω 为收敛因子, 其取值范围为(0,1], 决定了可变步长功率控制算法的收敛速度. 由(5)式可得: 当上行链路质量处于 $SINR^{(n)} > \gamma_0$ 时, 用户站下一时刻的上行发射功率 $p^{(n+1)}$ 将减小; 当上行链路质量处于 $SINR^{(n)} < \gamma_0$ 时, 用户站下一时刻的上行发射功率 $p^{(n+1)}$ 将增大; 而功率控制步长的大小, 即 $p^{(n+1)} / p^{(n)}$ 是随 $SINR^{(n)}$ 与 γ_0 比值的大小而变.

2.3 可变步长算法收敛性

上行功率控制算法必须满足收敛的性质, 即无论各同频用户站上行初始发射功率如何分配, 功率控制算法可以让各同频用户站上行发射功率和上行链路的 $SINR$ 值最终收敛于 1 个固定值. 根据 Yates 提出的标准功率控制算法的具体构架^[3], 功率控制算法 $I(p)$ 收敛需满足的 3 个条件.

(1) 正定性: 当 $p > 0$ 时, $I(p)$ 满足 $I(p) > 0$;

(2) 单调性: 当 $p \geq p'$ 时, $I(p)$ 满足 $I(p) \geq I(p')$;

(3) 扩展性: 存在任何给定的 $\alpha > 1$, $I(p)$ 满足 $\alpha I(p) > I(\alpha p)$;

证明(5)式的 WiMAX 系统上行链路可变步长功率控制算法满足 Yate 提出的 3 个条件.

证明 $I(p) = p(\gamma_0 / SINR^{(n)})^\omega = p(\gamma_0 IN^{(n)} / pg)^\omega$.

当 $p > 0$ 时, 可得 $I(p) = p \cdot (\gamma_0 / SINR^{(n)})^\omega > 0$, 满足条件(1);

当存在 $p \geq p'$ 时,

$$\begin{aligned} I(p) - I(p') &= p \cdot (\gamma_0 / SINR^{(n)})^\omega - \\ & p' \cdot (\gamma_0 / SINR^{(n')})^\omega = \\ & (\gamma_0 \cdot IN^{(n)} / g)^\omega (p^{1-\omega} - (p')^{1-\omega}) \geq 0, \end{aligned}$$

可得 $I(p) \geq I(p')$, 满足条件(2).

当存在 $\alpha > 1$ 时,

$$\begin{aligned} \alpha I(p) - I(\alpha p) &= \alpha p \cdot (\gamma_0 \cdot IN^{(n)} / pg)^\omega - \\ & \alpha p \cdot (\gamma_0 \cdot IN^{(n)} / \alpha pg)^\omega = \\ & p \cdot (\gamma_0 \cdot IN^{(n)} / pg)^\omega (\alpha - \alpha^{1-\omega}) > 0, \end{aligned}$$

可得 $\alpha I(p) > I(\alpha p)$, 满足条件(3), 因此 WiMAX 系统上行链路可变步长功率控制算法是可收敛的.

3 算法仿真及性能分析

采用 OPNET 网络仿真软件建立 WiMAX 系统 7 蜂窝同频小区场景, 通过仿真得到 ω 合理取值. 假设场景内各同频用户站为静止状态(即它们与基站间上行链路损耗不变), 且采用相同目标 $SINR$ 值, $\gamma_0 = 9.4$, 选取场景中 4 个处于不同小区的用户站进行仿真. 采用(2)式的固定步长算法进行上行链路 $SINR$ 值的仿真, 功率控制步长 Δp 分别选择 0.5 dB 和 1 dB. 如图 2 所示, 当 $\Delta p = 0.5$ 时, (2)式的

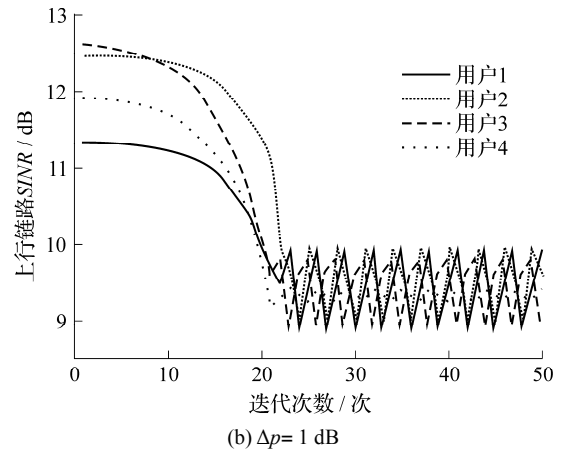
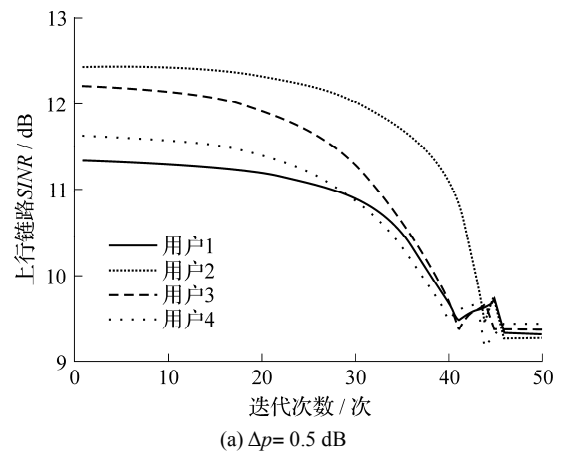


图 2 Δp 取 0.5 和 1 时固定步长算法收敛效果

固定步长算法趋于收敛且上行链路 SINR 值接近 9.4 dB, 但算法收敛需要 45 次左右的迭代; 当 $\Delta p = 1$ 时, 由于功率控制步长选择过大, 各用户站上行链路 SINR 值最终在 9.4 dB 左右震荡. 因此, 在上行带宽允许的情况下, (2) 式上行固定步长功率控制算法并不是理想的功率控制算法.

采用(5)式提出的 WiMAX 系统上行链路可变步长算法进行上行链路 SINR 值的仿真, 对收敛因子 ω 分别取 1/4, 1/2 和 1, 以分析收敛因子取值趋势. 如图 3 所示, 随着 ω 从 1/4 到 1 的增大, 上行链路的 SINR 值收敛速度加快, 同时功率控制效果也明显提高.

表 1 列示了 ω 不同取值时, (5) 式算法收敛需要的迭代次数.

表 1 ω 不同取值时算法收敛的迭代次数

ω 取值	1/4	1/2	3/4	1
收敛迭代次数	>70	42	24	15

从表 1 可以看到, 当 $\omega = 1$ 时, (5) 式算法的效果最好, 最终收敛需要的迭代次数最少, 各用户站上行链路最终收敛的 SINR 值最接近目标 SINR 值 9.4. 因此, $\omega = 1$ 是(5)式算法中 ω 的最佳取值, 得到其表达式如下:

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} \cdot (\gamma_0 / \text{SINR}^{(n)}). \quad (6)$$

(6) 式即是收敛速度最快的 WiMAX 系统上行链路可变步长功率控制算法表达式. 事实上, 这与 Foschini 和 Miljanic 提出的分布式功率控制算法不谋而合^[2].

4 结语

WiMAX 系统上行链路可变步长功率控制算法主要由系统的基站端完成. 算法在实际应用过程中其流程如下: 基站通过信道质量估计算法^[9]测量得到当前上行链路 SINR 值, 而不是通过式(2)计算得到; 用户站通过上行通信帧里的 RNG-REQ 消息格式将其当前上行发射功率大小报告给基站; 基

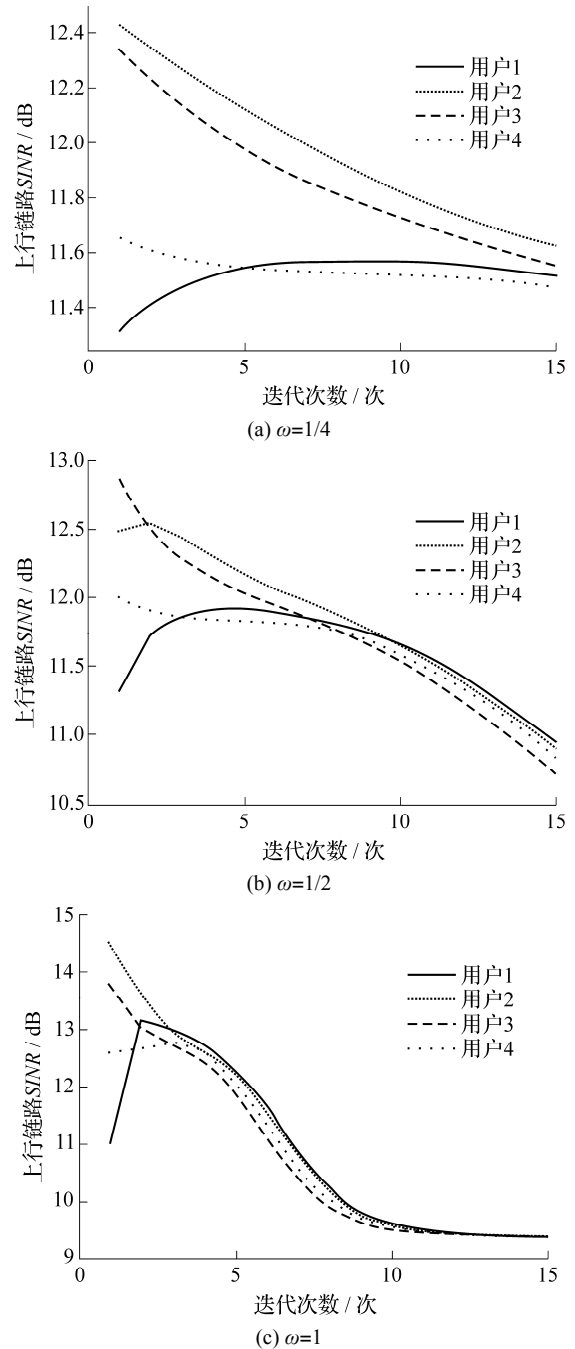


图 3 ω 不同取值时可变步长算法收敛效果

站根据得到当前上行链路 SINR 值和用户站的上行发射功率计算用户站下一时刻的上行发射功率, 从而得出功率控制步长 $(p^{(n+1)} - p^{(n)})$ 的大小, 并以二进制补码形式通过下行通信帧里的 RNG-RSP 消息格式中 Powe Level Adjust 信息字节传送给用户站. 如图 4 所示, Powe Level Adjust 信息字节是 1

个 8 bit 数据. 第 8 位为符号位: 0 代表正, 1 代表负. 从 1 到 7 位都为数据位, 设定每个二进制位代表 0.5 dB 的功率控制精度, 则功率控制范围可以达到 -63.5~63.5 dBm, 这个范围足以覆盖用户站的上行发射功率.

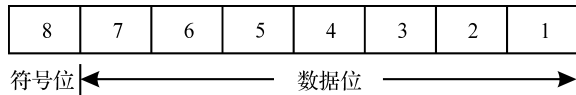


图 4 Power Level Adjust 信息字节内容

参考文献:

- [1] Zander J. Distributed co-channel interference control in cellular radio systems[J]. IEEE Trans Veh Tech, 1992, 41(3):110-116.
- [2] Foschini G J, Miljanic Z. A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence[J]. IEEE Trans On VT, 1993, 42(4):641-646.
- [3] Yates R D. A Framework for uplink power control in cellular radio systems[J]. IEEE Jour On SAC, 1995, 13(7): 1 341-1 347.
- [4] Huang C Y, Yates R D. Rate of convergence for minimum power assignment in cellular radio systems[J]. ACM/ Baltzer Wireless Networks J, 1998(1):223-231.
- [5] IEEE Standard 802.16TM-2004. Air interface for fixed broadband wireless access systems[S].
- [6] 王文博, 常永宇, 李宗豪. 移动通信原理与系统[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
- [7] 张天魁, 曾志民, 邱禹. 用于多小区 OFDM 系统的分布式上行功率控制算法[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34:561-566.
- [8] Tee L K, Rensburg V C, Tsai J A. Uplink power control for an OFDMA mobile cellular system[J]. IEEE Trans On VTC, 2006, 9:641-646.
- [9] 肖力. 第三代移动通信系统中的上行功率控制算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.

A WiMAX Uplink Power Control Algorithm with Variable Step

LI Jia-shu^{1,2}, HE Jia-ming^{1,2*}, ZHANG Qing-bo^{1,2}, HUANG Shan^{1,2}

(1.Communication Technology Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The power control technique is critical in wireless communication. According to governing terms in IEEE802.16 protocol and the co-channel interference in WiMAX system, a suitable power control algorithm is required for WiMAX system. Through improving the conventional close-loop power control algorithm, an algorithm with variable step is proposed, whose power control step can vary with the change of uplink channel state. The simulation result derives the suitable convergence factor and verifies the improvement of the proposed algorithm in terms of power control precision and convergence speed.

Key words: WiMAX; uplink; power control; variable step; convergence factor

CLC number: TN925.93

Document code: A

(责任编辑 章践立)