

WiMAX上行功率控制中分集合并研究

黎海涛¹, 吕海坤¹, 袁海英¹, 周艳慧²

(1. 北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 朝阳区 100124; 2. 国家广播电影电视总局 北京 西城区 100866)

【摘要】WiMAX上行链路采用功率控制提高系统容量和链路质量,在基于信号干扰噪声比(SINR)平衡准则的功率控制中,同道干扰和基站端天线合并算法对用于功率控制的SINR有重要影响。首先构建了WiMAX同道干扰模型,根据该模型推导出功率控制中SINR的中断概率;然后,针对基站端天线合并算法对SINR中断概率的影响,提出硬/软限幅合并算法。仿真结果表明,提出的合并算法能够有效抑制同道干扰,降低功率控制中SINR的中断概率,改善WiMAX上行功率控制性能。

关键词 同道干扰; 分集合并; 功率控制; 信号干扰噪声比; WiMAX

中图分类号 TP92

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.03.009

Research on Diversity Combining for WiMAX Uplink Power Control

LI Hai-tao¹, LÜ Hai-kun¹, YUAN Hai-ying¹, and ZHOU Yan-hui²

(1. College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology Chaoyang Beijing 100124;

2. The State Administration of Radio Film and Television Xicheng Beijing 100866)

Abstract Power control is efficiently utilized to improve WiMAX system capacity. For the signal interference and noise ratio (SINR) balance criterion based power control technique, the co-channel interference and the diversity combination of base station antenna have important effect on the SINR. In this paper, co-channel interference (CCI) model for WiMAX networks is presented, the outage probability of SINR with respect to power control is derived based on the CCI model and finally, hard/soft limiting combining algorithms are proposed to reduce interference. Simulation results show that the proposed combining algorithms can suppress the co-channel interference and reduce the outage probability of SINR, so that the power control performance of WiMAX uplink can be improved.

Key words co-channel interference; diversity combining; power control; SINR; WiMAX

WiMAX上行链路采用功率控制动态调整各子载波的发射功率,从而在保证一定通信质量的前提下降低发射功率。WiMAX上行功率控制包括闭环功率控制和开环功率控制。闭环功率控制指基站根据终端上行信号的测量值,通过空口消息发送给终端进行功率调整;开环功率控制是在基站不参与对终端发射功率控制情况下,终端根据估算的信道损耗逐步调整发射功率。

WiMAX上行功率控制策略包括基于接收信号强度指示(RSSI)的功率平衡准则和信号干扰噪声比(SINR)的功率平衡准则。在组网场景中,由于存在严重同道干扰,降低了基站接收信号质量。故一般采用基于SINR平衡的功率控制准则,使得基站与各终端间上行链路的接收SINR值相同。

在多小区WiMAX功率控制的研究中,大多采用

理想同道干扰模型,这不符合网络中同道干扰统计分布的实际情况。针对无线网络的同道干扰,文献[1]给出了一种基于高斯统计的同道干扰模型,但利用该模型分析同道干扰时,会使干扰信号出现不同程度的延迟,降低系统的误码率性能。文献[2-5]建立的同道干扰模型,只适用于统计意义上的各向同性或者完全独立的极端干扰分布情况。

同时,为了抑制干扰、降低信道衰落影响,WiMAX基站端采用了天线接收分集技术,这可以提高功率控制中SINR,降低SINR的中断概率。但在实际的同道干扰环境下,一般的天线分集合并算法,如等增益合并(EGC)、选择合并(SC)、最大比合并(MRC)等,其合并增益并不明显^[6-9]。因此,为了改善同道干扰环境下功率控制的性能,本文首先建立准确的WiMAX网络同道干扰模型,在该模型下推导

收稿日期: 2013-06-08; 修回日期: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(61001049); 北京市自然科学基金(4112012)

作者简介: 黎海涛(1972-),男,博士,副教授,主要从事无线通信、信号处理方面的研究。

出功率控制中SNIR的中断概率；然后，提出新的硬/软限幅分集合并算法来降低SINR中断概率，提高WiMAX功率控制性能。

1 SINR功率控制

在WiMAX系统功率控制中，终端入网初始化时，通过测距进行闭环功率控制；终端初始化后，基站通过开环功率控制调整终端发射功率。基站侧功率控制状态机如图1所示。

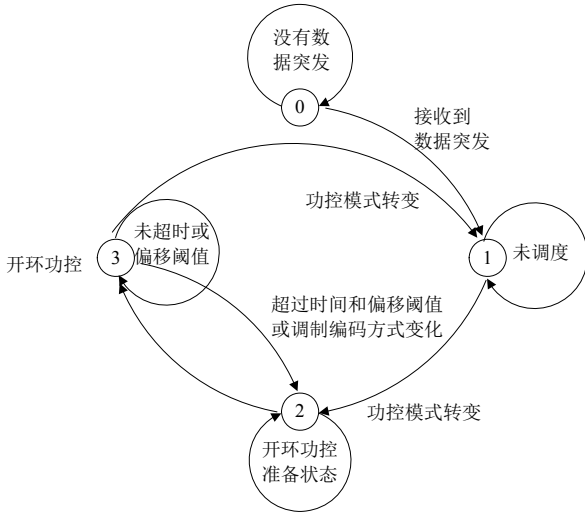


图1 功率控制状态机

图中，终端离线用状态“0”表示，若基站侧一直未接收到该终端上行数据突发，则默认终端保持离线状态；当接收到终端数据突发时，则认为终端为在线状态，用状态“1”表示。若该终端始终未被基本连接标识符(BCID)调度过，始终保持在线状态，即闭环功率控制模式；当终端初始入网同步后，即由闭环功率控制转变为开环功率控制后，先进入开环功率控制准备状态，用状态“2”表示。在该状态时，获取终端的调制编码方式(MCS)，以及用于开环功率控制的SINR测量值，准备进行开环功率控制。之后，由状态“2”变为状态“3”，即进入开环功率控制状态，此时会重新确认MCS是否发生变化。若变化，重新返回状态“2”，获取新的MCS和SINR；若未发生变化，则进行开环功率控制。

基站根据获取的终端MCS，得到期望接收SINR值，与基站侧测量的SINR进行比较，得到SINR调整值。若调整值超过偏移阈值或者开环功率控制超时，即不满足开环功率控制条件时，会重新回退到状态“3”；若未出现超出时间或阈值的情况，则按照SINR功率控制准则进行功率调整，完成上行链路开环功率控制。

从上述分析可以看到，功率控制的关键在于准

确地计算出SINR值，WiMAX系统基站侧的SINR计算原理如图2所示。

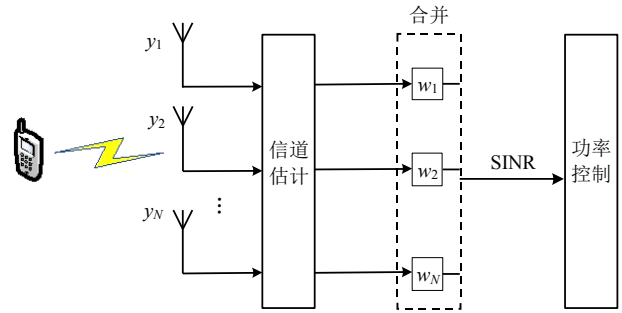


图2 SINR计算原理

首先，基站对天线接收信号进行解帧，得到频域数据；然后提取时隙(slot)中每个块(tile)的导频子载波，则第 s 个slot的导频子载波功率可表示为：

$$P_s = \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_p} |x_{ij}|^2 \quad (1)$$

式中， x_{ij} 表示第 s 个slot中第 i 个tile内的第 j 个导频子载波； N_p 为每个tile内导频子载波数目； N_t 表示每个slot内tile数目，根据IEEE 802.16e标准，可知 $N_p = 4$ ， $N_t = 6$ 。不同的数据突发(burst)在上行帧内占用不同时隙数目，当前帧中第 n 个burst的功率可表示为：

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N P_s \quad (2)$$

式中， P_s 表示当前burst中第 s 个slot的导频子载波功率； N 表示当前burst中slot数目。

通过信道估计得到的导频子载波端信道系数 h_{ij} ，利用导频子载波计算出第 s 个slot内的干扰和噪声为：

$$NI_s = \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_p} |x_{ij} - x_{ij} h_{ij}|^2 \quad (3)$$

则第 n 个burst内的干扰和噪声为：

$$NI_n = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N NI_s \quad (4)$$

由第 n 个burst的功率 P_n 、干扰和噪声 NI_n ，可计算出第 n 个burst的第 l 条支路信号干扰噪声比为：

$$SINR_{n,l} = \frac{P_n - NI_n}{NI_n} \quad (5)$$

最后将各支路的SINR合并，输出第 n 个burst的 $SINR_n$ 。

在开环功率控制中，基站根据终端当前的调制编码方式(MCS)，得到相应的期望接收SINR，把测量的 $SINR_n$ 与期望SINR进行比较，得到SINR的调整值，基站侧将该调整值发给终端，终端将自行计算

出新的发射功率, 从而实现功率控制。

2 SINR的中断概率

前面给出了基于SINR平衡准则的功率控制实现方法, 下面分析该方法的理论性能。在WiMAX组网系统中, 为了准确分析上行功率控制的性能, 需要通过构建同道干扰模型, 推导出基站端天线输出SINR的中断概率(outage probability), 进而研究功率控制的性能。

SINR的中断概率是由于接收信道干扰噪比的降低而导致信道无法工作的概率, 是评价功率控制性能的重要指标。当SINR增大时, 中断概率随之变小, 说明信道质量变好, 可以采用较高阶调制编码方式, 功率控制性能得到改善。SINR的中断概率定义为:

$$P_{\text{out}} = E_{\text{SINR}}(P(\text{SINR} < \theta_{\text{th}})) \quad (6)$$

式中, θ_{th} 是SINR门限值; SINR中断概率的理论计算如下:

在单输入多输出的WiMAX上行链路中, 基站侧接收信号 \mathbf{y} 可表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}s + \mathbf{z} + \mathbf{n} \quad (7)$$

式中, \mathbf{y} 为 $1 \times N$ 维向量, y_n 表示第 n 根天线的接收信号; s 表示发送信号; \mathbf{h} 表示瑞利衰落信道; \mathbf{z} 表示同道干扰, z_n 表示第 n 根天线的干扰; \mathbf{n} 表示加性热噪声。

则第 n 幅天线端的干扰为:

$$z_n = \sum_{i_0 \in \varphi_0} x_{0,i_0} r_{0,i_0}^{-\gamma/2} g_{0,n,i_0} + \sum_{i_n \in \varphi_n} x_{n,i_n} r_{n,i_n}^{-\gamma/2} g_{n,i_n} \quad (8)$$

式中, x_{k,i_k} 表示 φ_k 干扰源发送的第 i_k 个干扰; x_{0,i_0} 表

示 φ_0 干扰源发送的第 i_0 个干扰; φ_k 表示天线 k 独立接收的干扰源, φ_0 表示所有天线都能接收到的干扰源, φ_k 的密度为 λ_k , φ_0 的密度为 λ_0 ; g_{k,i_k} 表示干扰源的发射信号所经历的瑞利衰落信道; r_{n,i_n} 表示 i_n 干扰源到第 n 个天线的距离; γ 表示路径损耗指数, $n=1,2,\dots,N$, N 表示天线数目。

基站端合并模块中各支路加权系数矩阵 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_l, \dots, w_n]$, 其中 w_l 表示第 l 条支路的加权系数, 经合并后的输出信号可以表示成:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} = \mathbf{w}^T \mathbf{y} &= s \sum_{n=1}^N w_n h_n + \sum_{n=1}^N w_n z_n + \sum_{n=1}^N w_n \mathbf{n} = \\ &= s \sum_{n=1}^N w_n h_n + \sum_{n=1}^N \sum_{i_0 \in \varphi_0} x_{0,i_0} r_{0,i_0}^{-\gamma/2} w_n g_{0,n,i_0} + \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{i_n \in \varphi_n} x_{n,i_n} r_{n,i_n}^{-\gamma/2} w_n g_{n,i_n} + \sum_{n=1}^N w_n \mathbf{n} = \\ &= s \sum_{n=1}^N w_n h_n + \sum_{i_0 \in \varphi_0} x_{0,i_0} r_{0,i_0}^{-\gamma/2} \sum_{n=1}^N w_n g_{0,n,i_0} + \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{i_n \in \varphi_n} x_{n,i_n} r_{n,i_n}^{-\gamma/2} w_n g_{n,i_n} + \sum_{n=1}^N w_n \mathbf{n} \end{aligned} \quad (9)$$

因此, 合并后输出的信号干扰噪声比为:

$$\begin{aligned} \text{SINR} &= E_s \left| \sum_{n=1}^N w_n h_n \right|^2 / \left[\sum_{i_0 \in \varphi_0} x_{0,i_0} r_{0,i_0}^{-\gamma/2} \left(\sum_{n=1}^N w_n g_{0,n,i_0} \right) + \right. \\ &= \left. \sum_{n=1}^N \sum_{i_n \in \varphi_n} x_{n,i_n} r_{n,i_n}^{-\gamma/2} w_n g_{n,i_n} + \sum_{n=1}^N w_n \mathbf{n} \right]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $E_s = |s|^2$ 。当同道干扰远大于热噪声时, 为了简化计算, 可忽略噪声 \mathbf{n} , 则式(10)可简化成为:

$$\text{SINR} = \frac{E_s \left| \sum_{n=1}^N w_n h_n \right|^2}{\left[\sum_{i_0 \in \varphi_0} x_{0,i_0} r_{0,i_0}^{-\gamma/2} \sum_{n=1}^N w_n g_{0,n,i_0} + \sum_{n=1}^N \sum_{i_n \in \varphi_n} x_{n,i_n} r_{n,i_n}^{-\gamma/2} w_n g_{n,i_n} \right]^2} \quad (11)$$

将式(11)代入到SINR的中断概率定义式(6)中,

可以进一步得到SINR的中断概率:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= E \left[P \left(\frac{E_s \left| \sum_{n=1}^N w_n h_n \right|^2}{\left[\sum_{i_0 \in \varphi_0} x_{0,i_0} r_{0,i_0}^{-\gamma/2} \sum_{n=1}^N w_n g_{0,n,i_0} + \sum_{n=1}^N \sum_{i_n \in \varphi_n} x_{n,i_n} r_{n,i_n}^{-\gamma/2} w_n g_{n,i_n} \right]^2} < \theta_{\text{th}} \right) \right] = \\ &= E \left[P \left(\left| \sum_{i_0 \in \varphi_0} x_{0,i_0} \|r_{0,i_0}\|^{-\gamma/2} \sum_{n=1}^N w_n g_{0,n,i_0} + \sum_{n=1}^N \sum_{i_n \in \varphi_n} x_{n,i_n} \|r_{n,i_n}\|^{-\gamma/2} w_n g_{n,i_n} \right| > \frac{\sqrt{E_s} \left| \sum_{n=1}^N w_n h_n \right|}{\sqrt{\theta_{\text{th}}}} \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

假设构建的干扰源 φ_0 和 φ_n ($n=1,2,\dots,N$) 在WiMAX无线网络中的分布服从二维平面空间的均

匀泊松点过程, 那么干扰源 φ_0 中的干扰 x_{0,i_0} 和干扰源 φ_k 中的干扰 x_{k,i_k} 可以构成泊松点过程集合, 泊松

点过程集合 $x'_i (i \in U_{n=0}^N)$ 也是一个泊松过程, 其强度等于集合内各泊松点过程的强度之和, 即 $\sum_{n=0}^N \lambda_n$, 故式(12)可简化为:

$$P_{\text{out}} = E \left[P \left[\left| \sum_{i \in U_{n=0}^N} x'_i (r'_i)^{-\gamma/2} g'_i \right| > \frac{\sqrt{E_s} \left| \sum_{n=1}^N w_n h_n \right|}{\sqrt{\theta_{\text{th}}}} \right] \right] \quad (13)$$

式中, r'_i 表示第 i 个干扰源到接收端的距离; x'_i 表示所有干扰源的发射信号; g'_i 是 $N+1$ 项的复高斯混合随机变量, 其方差为 $\|\mathbf{w}\|^2 \sigma^2$ (即 $|w_1|^2 \sigma^2, |w_2|^2 \sigma^2, \dots, |w_N|^2 \sigma^2$), 权值分别为 $\lambda_0 / \sum_{n=0}^N \lambda_n, \lambda_1 / \sum_{n=0}^N \lambda_n, \dots, \lambda_N / \sum_{n=0}^N \lambda_n$ 。根据文献[10], $\sum_{i \in U_{n=0}^N} x'_i \|r'_i\|^{-\gamma} g'_i$ 服从对称 α 稳定分布, SINR的中断概率可表示为:

$$P_{\text{out}} \approx \pi \left(\sum_{n=0}^N \lambda_n \right) E[(x'_0)^\alpha] E[(g'_0)^\alpha] E \left[\left(\frac{\sqrt{E_s} \left| \sum_{n=1}^N w_n h_n \right|}{\sqrt{\theta_{\text{th}}}} \right)^{-\alpha} \right] \quad (14)$$

式中, $\alpha = 4/\gamma$ 。由于设定收、发端之间的信道 h_n 为瑞利分布, 干扰源与接收端之间的信道 g'_0 为复高斯随机变量, 则式(14)简化为:

$$P_{\text{out}} = \pi \times 2^{\alpha/2} \Gamma(1 - \alpha/2) E_s^{-\alpha/2} \sigma_s^{-\alpha} \sigma_i^{-\alpha} \Gamma \left(\frac{1 + \alpha}{2} \right) \times E(X^\alpha) \frac{\sum_{n=1}^N \lambda_n |w_n|^\alpha + \lambda_0 \|\mathbf{w}\|_2^\alpha}{\|\mathbf{w}\|_2^\alpha} \theta_{\text{th}}^{\alpha/2} \quad (15)$$

从式(15)可以看出中断概率与设定的阈值 θ_{th} 、干扰源密度 λ_n 成正比。

当干扰源 φ_n 是独立同分布且干扰源与接收端之间的衰落也是独立同分布的, 每根天线处的干扰功率电平值将正比于 $\lambda_0 + \lambda_n$, 故第 n 根天线的合并加权系数可表示为 $w_n = h_n^* / (\lambda_0 + \lambda_n)$, 代入式(15), 得到MRC合并SINR的中断概率:

$$P_{\text{out}}^{\text{MRC}} \approx \pi E_s^{-\alpha/2} \sigma_s^{-\alpha} \times 2^{\alpha/2} \Gamma \left(\frac{1 + \alpha}{2} \right) E(X^\alpha) \times E \left[\frac{\sum_{n=1}^N \lambda_n |h_n|^\alpha}{\|\mathbf{h}\|_2^{2\alpha}} + \frac{\lambda_0}{\|\mathbf{h}\|_2^\alpha} \right] \theta_{\text{th}}^{\alpha/2} \quad (16)$$

设每根天线独立接收的干扰密度相同, 即 $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda_e$, 式(16)可简化为:

$$P_{\text{out}}^{\text{MRC}} \approx \pi E_s^{-\alpha/2} \sigma_s^{-\alpha} \times 2^{\alpha/2} \Gamma \left(\frac{1 + \alpha}{2} \right) E(X^\alpha) \times E \left[\frac{\lambda_e \|\mathbf{h}\|_2^\alpha}{\|\mathbf{h}\|_2^{2\alpha}} + \frac{\lambda_0}{\|\mathbf{h}\|_2^\alpha} \right] \theta_{\text{th}}^{\alpha/2} \quad (17)$$

3 SINR限幅合并算法

基于SINR平衡准则的开环功率控制, 通过基站侧天线端合并模块计算得到burst的SINR测量值进行功率控制, 可见, 合并算法对功率控制性能有重要影响。

上节构建的干扰模型 $\sum_{i \in U_{n=0}^N} x'_i \|r'_i\|^{-\gamma} g'_i$ 服从对称

α 稳定分布, 而对称 α 稳定分布是钟形脉冲分布^[11], 故该同道干扰模型存在脉冲干扰。为了抑制脉冲干扰, 本小节基于信号预畸变技术中的限幅思想, 提出硬/软限幅合并算法, 即通过预先设定门限, 对信号包络超过门限值的部分直接删除或衰减。通过优化MRC算法中的加权系数矩阵 \mathbf{w} , 抑制脉冲干扰, 提高合并后输出SINR, 降低SINR的中断概率。

3.1 硬限幅合并

一般的硬限幅技术中, 预先设定接收的信号门限 A_{max} , 当信号经过预设门限 A_{max} 时直接对时域信号进行限幅^[12]。在输入信号的幅度小于门限 A_{max} 时, 信号直接传输; 在输入信号幅度大于门限 A 时, 信号幅度被限制为门限 A_{max} , 其原理图如图3所示。

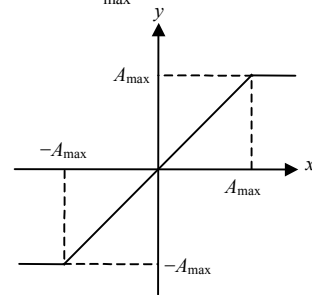


图3 硬限幅原理图

考虑到在合并算法中, 所构建的同道干扰模型存在脉冲噪声, 并且当同一频点有多个用户使用, 将造成该频点功率过大也会产生脉冲噪声。为此, 提出硬限幅合并算法, 将根据每根天线的接收信号与预先设定阈值进行比较, 忽略超出阈值的天线, 即该天线在合并算法中加权为0, 硬限幅合并的加权系数 w_n^{HL} 可以表示为:

$$w_n^{HL} = \begin{cases} h_n^* & \Delta \leq \tau \\ 0 & \Delta \geq \tau \end{cases} \quad (18)$$

式中, $\Delta = \|y_n - \text{median}(y)\|$; τ 是设定的阈值, 当接收信号未超过阈值时, 硬限幅合并的加权系数 w_n^{HL} 为MRC的加权系数 h_n^* 。

3.2 软限幅合并

从图3可以看出, 在硬限幅技术中, 限幅区域处是一条水平的直线, 其斜率为0, 代表信号超过限幅器时会直接被忽略, 而没有任何过渡。针对硬限幅技术的缺陷, 下面提出软限幅技术。

软限幅技术的基本思想是: 为使信号通过限幅器时有一个过渡, 在限幅区域处设置一条斜率非零的直线。与硬限幅相比, 软限幅逐步衰减超过阈值的部分, 其原理图如图4所示。设计软限幅合并的加权系数为:

$$w_n^{SL} = e^{-\eta \Delta} h_n^* \quad (19)$$

式中, η 表示软限幅合并衰落系数, 决定衰减速度。

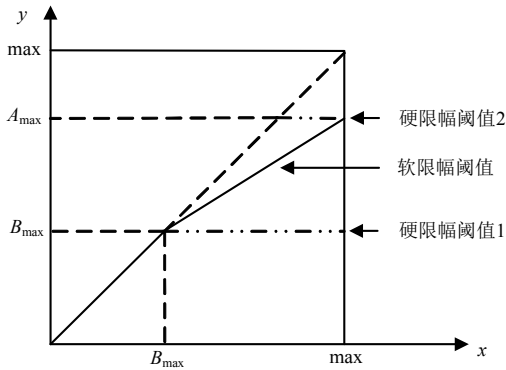


图4 软限幅原理图

在硬限幅合并算法中, 若某根天线的接收电平与其他各天线接收中值的差超过阈值时, 该天线的增益效果直接被忽略, 造成资源浪费。而软限幅合并算法, 对于受脉冲噪声影响的接收天线, 通过衰减该天线在合并算法中的加权系数, 而非忽略不计, 以此来充分利用每支路信号, 得到更好的分集合并效果。

4 仿真结果

利用构建的同道干扰模型, 本文在不同干扰场景、不同天线数配置, 对采用硬/软限幅、MRC合并算法的WiMAX上行功率控制中SINR的中断概率进行了仿真, 并与理论推导出的中断概率进行了对比。仿真参数如下: $\lambda_0 + \lambda_e = 0.01$, $\sigma_H = 1$, $\gamma = 6$, $\alpha = 4/\gamma = 2/3$, $E[X] = 1$, $\tau = 0.5$, $\eta = 1$, 调制方式为64 QAM, 高斯噪声方差为0.001, SINR的中断

门限值为2 dB。

为了分析空间干扰分布特性对中断概率的影响, 设定接收天线数目 $N = 3$ 。 $\lambda_0 = 0$, $\lambda_e = 0.01$ 表示各天线接收到的干扰是相互独立的, 且强度相等; $\lambda_e = 0$, $\lambda_0 = 0.01$ 表示各天线接收的是同向干扰, 即干扰源 ϕ_0 对所有接收天线均造成干扰。不同空间干扰分布场景中SINR的中断概率如图5所示。

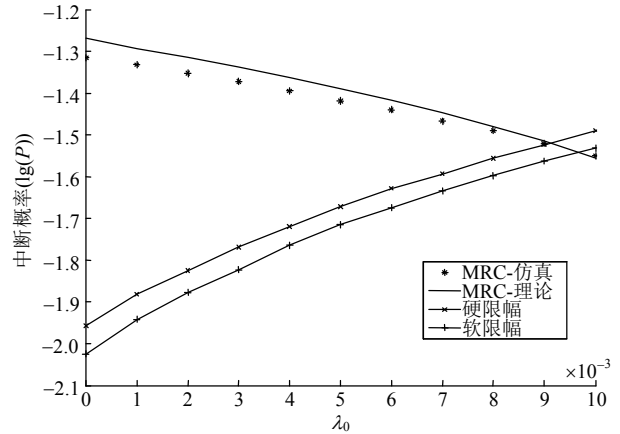


图5 空间干扰分布对中断概率的影响

从图5中可以看到, 随着空间干扰分布的变化, 提出的硬/软限幅合并算法, 都可以获得优于MRC的SINR中断概率。因此, 在基于SINR功率控制准则的开环功率控制中, 使用所提的改进合并算法, 可以提高SINR, 降低SINR的中断概率, 功率控制性能将得到改善。而且, 推导的理论MRC中断概率(MRC-理论)与仿真的MRC中断概率(MRC-仿真)较为一致, 验证了式(17)所推导出的中断概率的正确性。

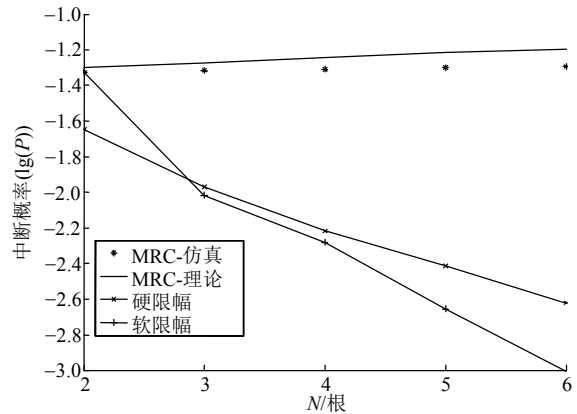


图6 天线数目对中断概率影响

图6给出了一般WiMAX组网场景下, 天线数的变化对SINR中断概率的影响。可以看到, 随着天线数目 N 的增加, 本文所提出的硬/软限幅合并算法可以提高SINR, 降低SINR的中断概率, 说明信道质量变好, 终端可以采用较高阶调制方式和编码率, 功率控制性能得到改善。

5 结束语

本文首先分析WiMAX系统中SINR功率控制平衡准则, 考虑到基站端天线合并算法对SINR平衡准则的开环功率控制的重要性, 通过建立适用于WiMAX系统上行链路的同道干扰模型, 推导出基站端天线MRC合并的SINR的中断概率。由于所构建的同道干扰模型服从钟形脉冲分布, 存在脉冲噪声。又基于信号预畸变思想, 提出硬/软限幅合并算法抑制脉冲噪声。仿真结果表明, 采用所提合并算法能够提高SINR, 有效降低SINR的中断概率, 改善功率控制系统性能, 提高系统容量和链路质量。

参 考 文 献

- [1] YANG Xue-shi, PETROPULU A P. Co-channel interference modeling and analysis in a poisson field of interferers in wireless communications[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(1): 64-76.
- [2] ALI O B S, CARDINAL C, GAGNON F. Performance of optimum combining in a poisson field of interferers and rayleigh fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(8): 2461-2467.
- [3] AHN K S, HEATH R W. Performance analysis of maximum ratio combining with imperfect channel estimation in the presence of cochannel interferences[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3): 1080-1085.
- [4] TEPEDELENLIOGLU C, GAO Ping. On diversity reception over fading channels with impulsive noise[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(6): 2037-2047.
- [5] RAJAN A, TEPEDELENLIOGLU C. Diversity combining over rayleigh fading channels with symmetric alpha-stable noise[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(9): 2968-2976.
- [6] ZANG Rui, WEI Ji-bo, MICHELSON D G, et al. Outage probability of MRC diversity over correlated shadowed fading channels[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(5): 516-519.
- [7] FARID A A, HRANILOVIC S. Diversity gain and outage probability for MIMO free-space optical links with misalignment[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 60(2): 479-487.
- [8] LIN Xiao-chen, TAO Mei-xia, XU You-yun, et al. Outage probability and finite-SNR diversity-multiplexing tradeoff for two-way relay fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7): 3123-3136.
- [9] CHOI K W, KIM D I. Outage probability analysis of macro-diversity combining in poisson field of access points[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(8): 1208-1211.
- [10] SAMORODNITSKY G, TAQQU M S. Stable non-gaussian random processes: stochastic models with infinite variance[M]. New York: Chapman and Hall, 1994: 23-26.
- [11] NASSAR M, GULATI K, SUJEETH A K, et al. Mitigating near-field interference in laptop embedded wireless transceivers[C]//2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Las Vegas: IEEE Press, 2008: 1405-1408.
- [12] 高天. 降低OFDM系统中峰均比方法的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
GAO Tian. A research on reducing PAPR of the OFDM system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.

编辑 张俊