



# 多天线WiMAX系统容量分析

王志辉 宋俊德 北京邮电大学

**【摘要】**文章提出了一种基于等效载干比门限的多天线WiMAX系统容量分析方法，首先阐述了容量分析的假设条件，然后详细介绍了基于等效载干比门限的MIMO系统容量分析方法。仿真验证表明，该方法是一种简便有效的关于MIMO蜂窝系统容量性能的理论分析方法。

**【关键词】**WiMAX 系统容量 MIMO 空间分集 同频干扰 等效载干比门限

研究表明<sup>[1,2]</sup>，利用多天线多输入多输出（MIMO，Multiple Input Multiple Output）技术可大大提高信道容量，WiMAX系统也采用了多天线技术，因此有关WiMAX系统的容量分析显然有着重要意义。目前对于MIMO技术的容量分析大多集中于链路级<sup>[1,2]</sup>，而在考虑同频干扰的无线系统中，情况将有所改变<sup>[3]</sup>。现阶段针对多天线系统级的容量分析较少，主流方法大都是对系统的遍历性容量（Ergodic Capacity）进行分析，即以系统用户互信息量之和来表示系统容量<sup>[4,5]</sup>，优势在于：可以精确地给出多天线系统容量的理论上限，度量单位（bps）非常适用于未来移动通信的多业务模式，可以使多种不同类型的语音或数据业务在数据速率这一层面得到统一的描述。

但该方法仍有一定的缺憾，其形式较为复杂，无法

直观有效地表示MIMO系统的容量特征。在实际的系统设计中，我们不仅希望了解系统的遍历性容量，还比较关注系统的中断率容量（Outage Capacity）。因此，本文提出了一种较简便的分析方法，以直观的系统用户数表示多天线WiMAX系统中断率容量。通过分析和仿真验证可以看到，新方法虽然存在一些不足，但与主流分析方法相结合，可以更好的反映系统容量性能。

## 1 容量分析的假设条件

(1) 假设多天线WiMAX系统的天线间距足够大，各信道之间不相关，并且信道为平坦准静态瑞利衰落信道<sup>[1,2]</sup>；

(2) 假设发送端功率受限，接收端可以对信道进行理想估计，而发送端只知道信道的概率分布但不知道具体信道信息。此时，研究表明<sup>[2]</sup>，在上文假设的平坦准

收稿日期：2008年4月13日

责任编辑：林菊 jasmine.lin@126.com >> >

静态瑞利衰落信道情况下，多天线系统在所有发送天线平均分配功率的情况下达到最大遍历性容量。因此，在分析中，假设总发射功率在MIMO系统所有发送天线之间平均分配；

(3) 假设发送端天线数目足够多。由于移动台往往受到尺寸限制无法安置多个天线，因此本文的方法更适用于分析多天线系统的下行容量；

(4) 在接收端将所有同频干扰作为空间不相关的高斯白噪声来考虑（若干扰为空间相关且受到衰落影响，则结果会更加乐观<sup>[6]</sup>），因此，本文的分析结果可作为MIMO系统容量的下限；

(5) 系统为干扰受限，即信噪比足够高，噪声与干扰相比可忽略；

(6) 假设各用户所有情况相同，即对应于单业务模式；

(7) 假设WiMAX系统每个用户的同频干扰源最多为6个，MIMO天线阵为理想全向天线阵。

## 2 基于等效载干比门限的MIMO系统容量分析

在单一业务的无线系统中，无MIMO时，可通过载干比分析的方法，得到系统的中断率容量<sup>[7]</sup>。但采用MIMO技术后，载干比情况变得较为复杂，不宜直接通过接收端的实际载干比进行容量分析。本文提出一种新的方法，通过分析得出MIMO系统的等效载干比门限，进而通过传统的载干比分析方法得到系统可实际容纳的用户数。

### 2.1 推导MIMO系统的等效载干比门限

若多天线WiMAX系统的接收天线数目 $N_r=r$ ，发送天线数目 $N_t=t$ ，则MIMO信道的遍历性容量可表示为<sup>[2]</sup>：

$$C=E[\log_2 \det(I_r + H Q H^T)] \quad (1)$$

其中，符号“ $E$ ”为求数学期望，符号“ $+$ ”为求共轭转置， $I_r$ 为 $r$ 阶单位矩阵， $Q$ 为发送信号的协方差矩阵， $H$ 为归一化的 $r \times t$ 信道矩阵且其元素为独立同分布的零均值单位方差圆对称复高斯随机变量。根据上文的假设条

件(2)和(3)，以及公式(1)可进一步化为<sup>[2]</sup>：

$$C=r\log_2(1+\rho) \quad (2)$$

其中， $\rho$ 为MIMO系统接收端的平均信噪比。

由香农公式，SISO(Single Input Single Output)信道的遍历性容量为： $C'=E[\log_2(1+\rho' |h|^2)]$ ，其中 $\rho'$ 为SISO系统接收端的信噪比， $h$ 是归一化后的信道增益，即满足 $|h|^2=1$ ，由Jensen不等式，公式可进一步化为：

$$C'=E[\log_2(1+\rho' |h|^2)] \leq [\log_2(1+\rho')] \quad (3)$$

在实际系统中，噪声包括同频干扰和白噪声两部分。由于所研究的为干扰受限系统，因此 $\rho$ 和 $\rho'$ 可近似看作接收端的载干比(CIR)。令 $C'=C$ ，即 $\log_2(1+\rho') \geq r\log_2(1+\rho)$ ，进而可得：

$$\rho \leq (1+\rho')^{1/r} - 1 \quad (4)$$

由(4)式可知，为达到相同的容量需求，若SISO系统需要的接收载干比为 $\rho'$ ，则MIMO系统的接收载干比只需 $\rho \leq (1+\rho')^{1/r} - 1$ 即可。从而可以近似认为，当SISO蜂窝系统的接收端允许的最小载干比即载干比门限( $CIR_{min}$ )为 $\gamma'$ 时，在相同环境下，使用MIMO技术后，接收端载干比门限变为 $\gamma=(1+\gamma')^{1/r} - 1$ ，后文称之为等效载干比门限。

### 2.2 仿真验证

本节将对上文提出的等效载干比门限理论进行仿真验证。由于上文中等效载干比门限的概念是基于理想的香农容量公式提出的，因此，信道编码越接近理想的系统与提出的理论相一致。方便起见，本文对未进行信道编码的系统进行蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真。

仿真时，除条件(3)外上文所有假设条件依然成立。此外，假设多天线WiMAX系统中，基站分别通过3根天线发送3个互相独立的未经信道编码的BPSK数据流，在接收端，3根接收天线经过理想的空时处理，3个独立的数据流被完全分离(即VBLAST空时编译码<sup>[8]</sup>)。SISO系统中，发送端则发送8PSK数据流，从而SISO和MIMO两个多天线WiMAX系统的容量都为3bps/Hz。

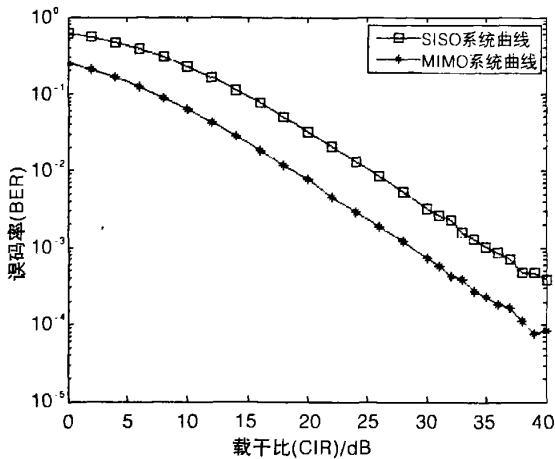


图1 SISO系统与MIMO系统的载干比——误码率对比曲线

仿真结果如图1所示。取图1中误码率为 $10^{-1}$ 时所对应的载干比值为载干比门限（误码率取到 $10^{-1}$ 并非过大，因为仿真中尚未进行信道编译码），则图中对应SISO的 $\gamma' = 15 \text{ dB} = 10^{1.5} = 32$ ，对应MIMO的 $\gamma = 7 \text{ dB} = 10^{0.7} = 5$ 。而理论分析中对应于 $\gamma' = 15 \text{ dB} = 32$ 的 $\gamma$ 值为： $\gamma = (1+32)^{1/3} - 1 = 2.2 = 3.4 \text{ dB}$ 。

由此可见，在发送的天线仅为3根时，仿真和理论分析中的等效载干比门限值相差约3.6dB。而当系统采用更有效的信道编码和性能更优的空时编码（如级联了顺序干扰删除的VBLAST编码<sup>[8]</sup>）并配置足够多的发送天线时，我们有理由相信，仿真结果将与理论分析结果将更加接近。

### 2.3 系统容量分析步骤

根据式（4），可由现有的SISOWiMAX系统的接收载干比门限 $\gamma'$ 计算出使用MIMO技术后的等效载干比门限 $\gamma$ ，进而通过载干比分析推导出WiMAX系统的中断率容量<sup>[7]</sup>。下面以下行链路为例给出主要的计算步骤。

由文中第一部分的假设可得，用户*i*接收到的同频干扰功率为 $I_{tot} = \sum_{j=1}^6 \bar{I}_j$ ，其中， $\bar{I}_j$ 为来自第*j*个同频干扰源的平均干扰功率： $\bar{I}_j = E[A_j]P_j K E[10^{10}] / j^{-n}$ ，其中， $A_j$

代表用户活跃度，为贝努利随机变量， $E[A_j] = q = LF_{avg}$ 。  
 $DTXF(LF_{avg})$ 为系统可用信道被用户占用的比率即负载因子 $LF$ 的平均值， $DTXF$ 为不连续发送因子； $P_j$ 为发送功率； $K$ 为常量，取决于载波频率以及发送天线和接收天线的高度； $I_j$ 为第*j*个同频干扰源基站到用户*i*的距离； $n$ 为路损指数； $\lambda_j$ 为第*j*个干扰源的阴影参数， $E[10^{\frac{\lambda_j}{10}}] = \exp(\alpha\sigma^2/2)$ （其中， $\sigma$ 为对数阴影衰落标准差， $\alpha$ 为常量系数）。

用户*i*接收到的载波功率为： $C = P_i K 10^{\frac{\lambda}{10}} r_i^{-n}$ ，其中 $\lambda$ 为阴影参数， $r_i$ 为用户*i*到WiMAX基站的距离。

则用户*i*的接收载干比 $\rho = C/I_{tot}$ ，又多天线WiMAX系统等效载干比门限 $\gamma = (1 + \gamma')^{1/n} - 1$ 。则用户*i*的中断率 $P_{out,i}$ （载干比小于或等于载干比门限的概率）为：  
 $P_{out,i} = P(\rho < \gamma) = P(C/I_{tot} < (1 + \gamma')^{1/n} - 1)$ ，代入 $I_{tot}$ 和 $C$ 得：  
 $P_{out,i} = P(10^{\frac{\lambda}{10}} < [(1 + \gamma')^{1/n} - 1] I_{tot} / (K P_i r_i^{-n})) = 1 - Q(\beta/\sigma)$ ，其中， $\beta = 10 \log([(1 + \gamma')^{1/n} - 1] / I_{tot} / (K P_i r_i^{-n}))$ 。

接着对用户*i*在整个WiMAX基站覆盖范围内所有位置上的 $P_{out,i}$ 进行平均，即可得整个系统的中断率：

$$P_{out} = \int_0^{2\pi} \int_0^R [1 - Q(\beta/\sigma)] f(r_i, \theta_i) r_i dr_i d\theta_i \quad (5)$$

其中， $R$ 为覆盖区域半径， $(r_i, \theta_i)$ 为用户*i*在覆盖区域的极坐标， $f(r_i, \theta_i)$ 为用户*i*在覆盖区内的位置概率密度，用户服从均匀分布时，其值为 $1/\pi R^2$ 。

根据式（5），即可由系统所能忍受的 $P_{out}$ ，得出负载因子 $LF_{avg}$ 的最大值 $LF_{max}$ ，从而用系统可容纳用户数来反映多天线WiMAX系统的中断率容量： $C = LF_{max} \cdot CH_{cell}$ （用户数/小区）， $CH_{cell}$ 表示每小区的可用信道总数。

### 3 总结

本文提出了一种新的多天线WiMAX系统容量理论分析方法，基于等效载干比门限的概念，可以较直观的对WiMAX系统采用MIMO技术后的容量下限进行大致的估算，从而弥补了主流分析方法<sup>[4, 5]</sup>的一些不足。通过仿

真验证，理论分析中的等效载干比门限与仿真结果的差距在3.6dB之内。

下一步的研究工作包括将提出的方法扩展到多业务WiMAX系统中、考虑干扰的空间相关性以及有限天线数目等情况。

### 参考文献

- [1] G J Foschini, M J Gans. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas [J]. *Wireless Personal Commun.*, Mar 1998, 6(3): 311-335.
- [2] E Telatar. Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels [J]. AT&T-Bell Laboratories, Internal Tech. Memo., June 1995.
- [3] S Catreux, L J Greenstein, P F Dressen. Simulation Results for an Interference-limited Multiple-input Multiple-output Cellular System [J]. *Communication Letters*, Dec 2000.
- [4] Rick S Blum. Analysis of MIMO Capacity with Interference [C]. ICC 2003—IEEE International Conference on Communications, May 2003, 26(1).
- [5] Dai H, Molisch AF, Poor HV. Downlink Capacity of Interference-Limited MIMO Systems with Joint Detection [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, March 2004, 3(2): 442-453.
- [6] Angel Lozano, Antonia Maria Tulino. Capacity of Multiple-Transmit Multiple-Receive Antenna Architectures [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, December 2002, 48(12): 3117-3128.
- [7] Mohamed H Ahmed, Samy A Mahmoud. Soft Capacity Analysis of TDMA Systems with Slow-Frequency Hopping and Multiple-Beam Smart Antennas [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, July 2002, 51(4).
- [8] P W Wolniansky, G Foschini, G Golden, et al. V-BLAST: an Architecture for Realizing very High Data Rates over the Rich-scattering Wireless Channel [C]. in Proceedings URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, 1998 : 295-300. ★

### 【作者简介】

**王志辉：**工学博士，目前是北京邮电大学讲师，主要研究领域为未来移动通信系统。



**宋俊德：**教授，博士生导师，北京邮电大学电子工程学院学术委员会主任，中国通信标准化协会CMIS主席，国际信息联合会IFIP TC7中国主席，现任工业和信息化部部级重点实验室PCN&CAD中心和CTI研究中心主任。出版专著和高校教材13部，发表论文近200篇，当前研究重点是下一代无线移动互联网理论与技术。

## 大唐2.2M HSDPA数据卡获入网证

6月17日，大唐移动自主研发的Hummer DTM5731无线上网卡通过工业和信息化部主持的TD-SCDMA终端入网测试，获得入网许可证。这是TD-SCDMA迄今为止数据速率最快的HSDPA数据卡，上网平均传输速率为1.5Mb/s ~ 1.6Mb/s，下行最高速率达2.2Mb/s，相当于512k的ADSL宽带下载速率的4倍。由于采用了USB2.0接口，可以满足家庭和办公室固定环境的宽带接入需求。

该款数据卡是大唐移动基于自身的TD-SCDMA手机解决方案。按照行业惯例，数据卡往往是终端解决方案的先行者和践行者，数据卡商用就意味着核心芯片组、通讯协议栈等核心部件的完全成熟。

目前，中国移动已要求TD-SCDMA网络于5月底完成向HSDPA的升级，奥运八城市HSDPA网络已具备提供HSDPA技术服务的能力。大唐移动重视TD-SCDMA终端核心技术的自主研发和技术领先，一直致力于推动民族通信产业发展。此次DTM5731赶在奥运前实现商用，大唐移动期待它能为奥运提供服务，实现中国第三代移动通讯高速数据业务服务奥运的目标。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>