

一种基于单天线移动终端的蜂窝链路 MIMO 容量增强技术

崔琪楣, 余雯, 陶小峰, 张平

(北京邮电大学 电信工程学院, 北京 100876)

摘 要: 针对因移动通信的迅猛发展使得移动通信系统重新显现的频谱匮乏、容量不足等问题, 提出一种基于单天线移动终端的蜂窝链路多入多出 (MIMO) 容量增强技术, 即基于超宽带技术的广义虚拟多入多出 (G-VMIMO) 结构的应用。文章详细讲述了 G-VMIMO 结构的原理和特点, 并从理论上分析该结构具有 MIMO 容量增强性能。文章给出了 G-VMIMO 系统的构成方法和协议流程, 并针对系统实现所面临的难点进行了详细探讨。最后, 计算机仿真验证了 G-VMIMO 系统的容量增强性能以及可行性。

关键词: 超宽带; 多频带一正交频分复用; 虚拟多入多出; 无线个域网; 脉冲无线电

中图分类号: TN91

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2005)10-0116-06

MIMO capacity enhancement technique of cellular link based on mobile terminal with single antenna

CUI Qi-mei, YU Wen, TAO Xiao-feng, ZHANG Ping

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract: A multiple-input-multiple-output (MIMO) capacity enhancement technique of cellular link based on mobile terminal with single antenna was proposed, which was the application of generalized virtual-MIMO architecture based on ultra wide-band (UWB) technique. The principle and benefits of G-VMIMO were detailed. Besides, the capacity enhancement of cellular link based on G-VMIMO was analyzed theoretically. The establishment of G-MIMO system was put forward, and the challenges brought by the practical application of G-VMIMO to the existing cellular networks and wireless personal area network (WPAN) were explored. Finally, computer simulation verifies the capacity enhancement and the validity of G-VMIMO.

Key words: ultra wide-band; MB-OFDM; virtual-MIMO; WPAN; impulse radio

1 引言

随着人们对个人通信的依赖和个人移动需求的不断提高, 用户数量和业务流量迅猛增长。同时, 移动多媒体业务的日益流行进一步刺激了无线流量的增多^[1,2]。移动通信系统曾出现过的频谱匮乏、容量不足、服务质量差及频谱利用率低等问题重新显现出来, 并且日益尖锐。无线传输的收发两

端采用多天线技术对高速多媒体传输是一种十分有效的方法, 因此 MIMO 技术成为其第三代移动通信 (3G) 增强型技术研究的一个关键点。随着移动通信技术的发展, MIMO 技术最终将会在超三代 (B3G) 或第四代 (4G) 移动通信系统中广泛应用。基站 (BS) 和移动终端 (MT) 采用多天线, MIMO 技术能提供更好的空间分集和更高的系统容量。在 3G 移动通信中以及在 B3G 或 4G 移

收稿日期: 2005-05-12; 修回日期: 2005-09-01

基金项目: 国家十五“863”计划资助项目 (2003AA123240); Intel 公司资助项目

动通信发展的初期,大量的 MT 可能仍采用单天线,原因是采用多天线会带来设备成本的提高、尺寸增加以及硬件实现的限制等问题。单天线 MT 完全转换为多天线 MT 需要经历一个的过渡时期。在这个时期,单天线 MT 限制了 MIMO 技术的应用,该技术的优势难以发挥。针对该问题,本文提出一种基于单天线移动终端的蜂窝链路容量增强方法。

2 基于 UWB 技术的无线个域网

当前,UWB 技术作为未来短距离高速数据通信应用领域最有潜力的技术而倍受关注^[3]。UWB 技术因其自身特性非常适用构建无线个域网。首先,它能够在室内密集多径衰落环境下提供高速的数据传输速率(100Mbit/s~1Gbit/s)。此外,UWB 系统设计多个传输参数易于匹配不同类型的数据流,数据传输速率和发射功率的可重配置更灵活。另一特点是脉冲无线电要求收发两端是同步的,这使得网络中同时存在的多个异步通信链路仍能有效地工作,尤其适于自组织(ad hoc)网络设计。

在个域网中,皮网(piconet)应运而生。piconet 是一个 ad hoc 数据通信系统,它允许多个相互独立的数据设备(DEV)彼此通信。皮网根据需要随机形成而不是预先设计的。基于 UWB 的皮网通信典型覆盖范围约为 10m~20m。皮网最基本的组成单元是 DEV。在一个皮网内,有一个 DEV 扮演网络协调者(PNC)的角色。PNC 提供定时、QoS 要求、功率节省模式和接入控制。当 PNC 离开皮网或当它将 PNC 功能传递给其他 DEV 时,PNC 将按照预定义的评估准则在所有 DEV 中选择最适合担当 PNC 的设备。在 WPAN 中,不同的皮网之间互相联系,它们彼此存在多种关系,如父子关系、邻居关系等^[4]。

3 广义虚拟多入多出结构

多输入多输出(MIMO)系统由于在增加频谱效率、提高通信质量上的巨大潜力及其组织结构的灵活性,并且能为各种新技术的采用提供广阔的发展空间,而成为未来移动通信系统设计中广泛被看好的架构。正是基于此思想,基于多天线系统构架的广义蜂窝网络结构——群小区(group cell)曾被提出^[5,6],在文献[5,6]中接入

点 AP(类似于第二代移动通信系统的基站收发信机(BTS)和第三代移动通信系统的节点 B(node B))被引入,而文中关于 G-VMIMO 原理的描述用到 AP。

3.1 原理

在 B3G 或 4G 系统中,每个 AP 内部有一个或多个分离的天线(或天线阵)。AP 可以使用全部或部分的天线(或天线阵)与某一 MT 进行通信;针对某一个 MT,在发送信号时 AP 所使用的天线(或天线阵)可以发送相同或不同的信号。多个 MT 彼此可以不通过 AP 而直接通信,MT 之间的连接物理层采用 UWB 传输技术。于是,任一个 MT 可以与其相邻的其他 MT 聚合在一起共同构成一个虚拟终端,定名为群终端(GT, group terminal)。任意 MT 可以借助其所在群终端内的其他 MT 的天线与 AP 通信。如图 1 所示,存在多个 GT,如 MT1 和 MT2 可以聚合构成 GT1,MT3 和 MT4 可以聚合构成 GT2,以及 MT5 和 MT6 构成 GT3。在群终端中,多个 MT 之间能够直接通信(不通过 AP),例如在 GT3 中,MT5 和 MT6 可以不通过 AP 而直接通信。MT6 可以通过自己的天线直接与 AP 通信,也可以借助 GT3 内 MT5 的天线与 AP 通信,即 MT5 和 MT6 可以彼此共享天线。从 AP 的角度看,群终端存在多个可与 AP 通信的天线,可以看作是虚拟多天线系统。

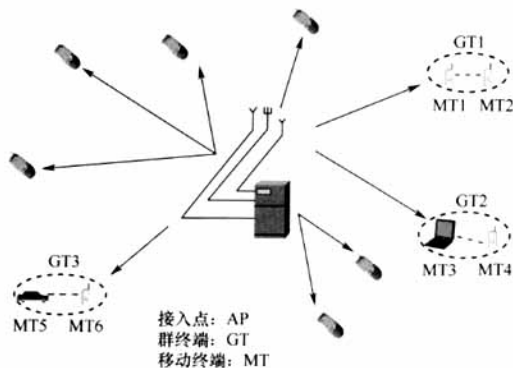


图 1 G-VMIMO 结构

AP 内部的天线(或天线阵)和 GT 之间存在多种通信方式。MT 可以通过 AP 所包含的多个单天线或多个天线阵或多个单天线和多个天线阵的混合天线阵与 AP 通信。于是,AP 和 GT 就可以形成 G-VMIMO 系统。

3.2 特征

1) 可行性。UWB 设备能支持 10m 范围内 100Mbit/s 到 480Mbit/s 的数据传输速率。仿真结果显示在相同的发送功率限制下, 当数据传输速率降低时或系统采用高性能的编码技术 UWB 设备的通信范围能扩展, 见图 4。当前快速发展的无线 USB 标准化工作意味着未来无线通信中支持 UWB 接口的设备会非常普遍, 而无线网络发展的最终趋势-无线泛在网络概念也预示着支持多模传输的智能设备也将会大量涌现。智能设备的广泛应用能够更好地解决功率受限的 UWB 系统传输距离短对 G-VMIMO 的应用造成的瓶颈问题。

UWB 作为一种极低功耗的无线传输技术, 它的应用不会对现存无线通信系统造成干扰。

2) 容量增益。与传统的蜂窝网络相比, G-VMIMO 系统的上/下行链路容量得到了显著提高, 其信道容量公式表示如下

$$C = \log \left(\det \left[\mathbf{I}_M + \frac{P_T}{N} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \mathbf{Q}_N^{-1} \right] \right) \quad (1)$$

其中等效信道矩阵为 $\mathbf{H} = \sqrt{P_R/M} \cdot \mathbf{H}_2 \cdot \mathbf{C}_{\text{norm}} \cdot \mathbf{H}_1$;

等效噪声矩阵为 $\mathbf{N}' = \sqrt{P_R/M} \cdot \mathbf{H}_2 \cdot \mathbf{C}_{\text{norm}} \cdot \mathbf{N}_0 + \mathbf{W}_0$,

\mathbf{N}_0 和 \mathbf{W}_0 均是高斯白噪声; N 表示发射端 (AP) 发送天线的数量; M 表示在 GT 内被目的终端 (DT) 共享天线的 MT (简称 ST) 的数量; P_R 为所有 ST 的总功率, 均匀地分配给 M 个 ST; P_T 为 AP 的总功率, 均匀地分配给 N 个天线; \mathbf{H}_1 是信道矩阵, 描述蜂窝链路无线传播信道的路径损耗和信道衰落特性; \mathbf{H}_2 是对角矩阵, 表征 ST 和 DT 之间 UWB

传播正交信道, 包含路径损耗和信道衰落信息;

\mathbf{C}_{norm} 为 ST 采用的对角矩阵, 用来归一化接收信号功率; \mathbf{I}_M 是一个 M 阶单位阵, \mathbf{Q}_N 表示 N 的协方差矩阵。5.2 小节的数字结果反映了系统的信道容量增益 (图 3 所示)。

在实际应用中, G-VMIMO 结构存在两种模式: 模式 I 表示 DT 仅通过共享天线与 AP 通信; 模式 II 表示 DT 不仅通过自身的天线而且还通过共享天线与 AP 通信。对于模式 I, 矩阵 \mathbf{H}_1 和 \mathbf{H}_2 为

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \frac{h_{11}^{(2)} \sqrt{g_{11}^{(2)}}}{C_{\text{norm}}^{(1)}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h_{22}^{(2)} \sqrt{g_{22}^{(2)}}}{C_{\text{norm}}^{(2)}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{h_{MM}^{(2)} \sqrt{g_{MM}^{(2)}}}{C_{\text{norm}}^{(M)}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} H_{11}^{(1)} & H_{12}^{(1)} & \cdots & H_{1N}^{(1)} \\ H_{21}^{(1)} & H_{22}^{(1)} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1}^{(1)} & \cdots & \cdots & H_{MN}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $C_{\text{norm}}^{(i)}$ 表示第 i 个 ST 采用的常数, 用来归一化接收信号功率; $h_{ii}^{(2)}$ 表示第 i 个 ST 和 DT 之间的信道衰落系数; $g_{ii}^{(2)}$ 表示第 i 个 ST 和 DT 之间的信道路径损耗; $H_{ij}^{(1)}$ 是信道矩阵 \mathbf{H}_2 的元素。

对于模式 II, 矩阵 \mathbf{H}_1 和 \mathbf{H}_2 为

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \frac{h_{11}^{(2)} \sqrt{g_{11}^{(2)}} \sqrt{\frac{P_R}{M}}}{C_{\text{norm}}^{(1)}} & & & \\ & \frac{h_{22}^{(2)} \sqrt{g_{22}^{(2)}} \sqrt{\frac{P_R}{M}}}{C_{\text{norm}}^{(2)}} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \frac{h_{MM}^{(2)} \sqrt{g_{MM}^{(2)}} \sqrt{\frac{P_R}{M}}}{C_{\text{norm}}^{(M)}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} H_{11}^{(1)} & H_{12}^{(1)} & \cdots & \cdots & H_{1N}^{(1)} \\ H_{21}^{(1)} & H_{22}^{(1)} & \cdots & \cdots & H_{2N}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{M1}^{(1)} & H_{M2}^{(1)} & \cdots & \cdots & H_{MN}^{(1)} \\ H_{D1}^{(0)} & H_{D2}^{(0)} & \cdots & \cdots & H_{DN}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $H_{Di}^{(0)}$, $i=1, \dots, N$ 表示 AP 和 DT 之间第 i 根天线的路径损耗和信道衰落, 上标(0)表示目的终端通过自身的天线与 AP 通信。

3) 灵活性和移动性。蜂窝网络具有很高的适用性, 健壮的安全机制和稳定性等特点。基于 UWB 技术的无线个域网是动态配置的, 具有自组织、自恢复的性能。两者相结合, 可以互相补不足, 吸取各自的优点。在此基础上, G-VMIMO 结构具有更高的灵活性和移动性。

4 G-VMIMO 实现

4.1 协议

G-VMIMO 构成的原则是在尽可能小的改变现有蜂窝网络和无线个域网协议的基础上构建系统, 主要分成三个关键步骤: 第一步是构建以 DT 为 PNC 的独立 piconet, 第二步是构建群终端, 第三步是无线个域网与蜂窝网的互通。在描述系统构成之前需说明一些条件: 当 MT 处于空闲模式时其 UWB 接口自动处于接听状态; 描述中采用的原语参看 IEEE 802.15.3 标准^[4]。

Step 1 DT 内设备管理实体 (DME) 执行浏览过程寻找可用的空闲信道用于构建独立的 piconet。DT 在找到的信道上发送 MLME-START.req 原语, 侦听一定时间后确定信道是否空闲。一旦确定信道可用, DT 将在每一个超帧周期内广播信标 (beacon) 帧一次, 并且给自己分配一个额外标识 PNCID 用于与将成为 piconet 成员的设备交流信息。一旦建立了 piconet, DT 周期地分配信道时间。

Step 2 在 DT 有效通信范围内, 一些处于空闲模式的 MT 周期地监测来自 DT 的 beacon 帧, 通过 beacon 信息, 先实现与 DT 的同步, 然后在竞争接入周期内发送关联请求命令 (MLME-ASSOCIAT.req) 给 DT, 表示请求接入以 DT 为 PNC 的 piconet。关联接入过程参看图 2。当 DT 正确接收到关联请求命令后, 立即发送 Imm-ACK 帧回复, 然后确定接受关联请求后再发送关联响应命令 (MLME-ASSOCIAT.rsp), 并分配新的标识 (DEV ID) 和地

址 (DEV addr) 给请求接入的 MT。当 MT 收到关联响应命令后, 第二次向 DT 发送包含 DEV ID 信息的 MLME-ASSOCIAT.req, DT 正确接收后再次向 MT 发送 Imm-ACK 帧以示确认。在 DT 完成第二次响应后, 随即更新 DEV 关联信息表 (IE)。

当所有的接入请求完成后, DT 的 IE 中已经记录了所有成功接入 piconet 的 MT (即 ST) 信息。随后, DT 以广播方式发送时间标签信令, piconet 内所有 MT 都向 DT 汇报各自接收到时间标签的时间。接收时间反映了 MT 与 DT 的距离, 因此 DT 将根据时间信息确定 ST 与 DT 之间的信息传输速率, 原则是选择距离最远的 MT 所能支持的最大速率。为了接收机处理简单, 所有 ST 采用相同速率。最后, 为减轻 DT 的负担, DT 传递 PNC 功能给其他的 ST。

Step 3 第三步需要定义新信令 MIMO.req 和 MIMO.release, 分别表示请求建立和请求释放 G-VMIMO 结构。Step1 之后, DT 和所有的 ST 均向 AP 发送包含 PNCID 的请求命令 MIMO.req, 当 AP 正确接收来自 DT 和 ST 的 MIMO.req 后, 将分配相同的信道给它们, 在整个基于 G-VMIMO 结构的通信中 DT 和 ST 始终用该信道。

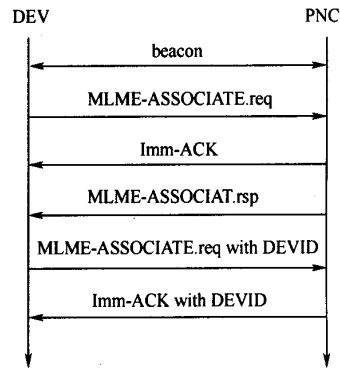


图 2 DEV 关联接入过程

完成上述步骤之后, 基于 G-VMIMO 结构的通信可以进行了。当通信结束时, 新的 PNC 以 UWB 方式广播发送 MIMO.release 信令, 通知释放 ST 连接。

4.2 系统实现挑战

本小节分别从物理层 (PHY)、无线链路层 (RLL) 和无线资源管理 (RRC) 层分析探讨实现 G-VMIMO 系统所面临的具体难点:

PHY G-VMIMO 系统要求 ST 同时支持两种无

线接口方式：蜂窝接口和 UWB 接口，且 UWB 接口传输蜂窝接口收到的基带信号，因此需要解决基带数据的存储、不同类型帧转换、下行链路 UWB 接口成帧时延对蜂窝速率的限制等问题。物理层必须完成距离估计（定位）、同步算法、编码调制等功能。ST 和 DT 之间传输速率的选择依赖于距离估计，而实现可变速率依靠自适应调制编码。当不同 ST 与 DT 的距离之差产生的时延大于 UWB 系统传输符号（如 MB-OFDM 系统）的十分之一时，即使 G-VMIMO 系统实现了很好的同步，系统性能仍会很差，因此需要解决该问题。此外，安全策略对于系统实际应用也是必需考虑的。

RLL RLL 最主要的功能之一是当物理层同时支持多种无线接口时为上层提供统一接口，根据变化的无线环境把应用层需求映射到合适的链路层配置。RLL 还要提供不同无线接入技术之间的无缝切换。MAC 层设计的关键集中在调度方案、功率控制、网络同步、协同通信机制等。在通信过程中，由于一些突发状况，一些 ST 的设备可能会突然消失，或者一些 MT 请求随机接入，协议设计中需要处理上述状况。

RRC 在蜂窝无线接口协议中，RRC 层是一个相对独立的功能块，它的功能主要包括建立、维持、释放 UTRAN 和 UE 之间的连接等。对于 G-VMIMO 系统，蜂窝网络的 RRC 层仅需要在信道资源配置功能上作适当扩展。

5 仿真分析

5.1 不同速率下 MB-OFDM 系统通信范围分析

在相同发射功率和接收灵敏度下，MB-OFDM 系统在不同数据速率时通信覆盖范围的性能被仿真。系统工作于模式 1（即 3 个子频带），信道模型采用 IEEE 802.15.3a CM1，详细的仿真参数参看文献[7]。数据传输速率的变化通过调整扩频增益系数实现。仿真结果如图 3 所示，当误比特率（BER）小于 10^{-3} 时，系统在 110Mbit/s 速率时最远传输距离约为 10m，11Mbit/s 速率时最远传输距离约为 21.5m，2Mbit/s 速率时最远传输距离约为 24m。当系统采用 LDPC 编码时^[8]，2Mbit/s 速率时最远传输距离可扩展到 27.6m。由仿真分析知，在低速率情况下，MB-OFDM 系统的通信范围更广，当系统采用高性能编码技术时，通信范围能进一步扩展。

5.2 信道容量分析

信道容量已有公式（1）给出。图 4 显示了模式 I 和模式 II 下 GT 包含的 MT 数量对 G-VMIMO 系统信道容量的影响，x 轴表示 GT 内 ST 的数量，y 轴表示系统的频谱效率。仿真参数： $N=2$ ；蜂窝小区半径为 1km；ST 的覆盖范围为 0.5km（蜂窝小区半径）和 20m（无线个域网范围）；蜂窝链路的路径损耗因子为 3.5，无线个域网连接路径损耗因子为 2；快衰落平均功率为 1W；下行链路的最大发送功率为 10W，不考虑阴影衰落；任意 ST 的最大发送功率为 1mW；噪声功率为 -115dBW。

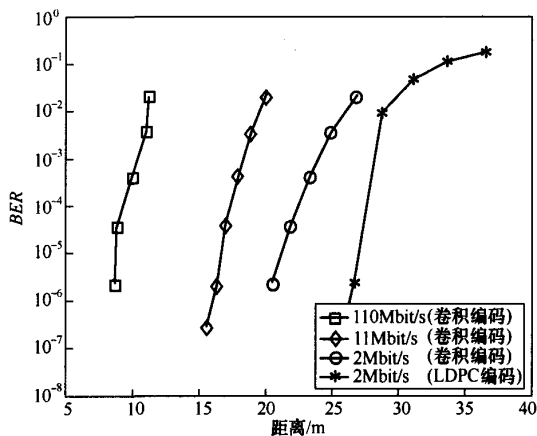


图 3 不同数据速率下 UWB MB-OFDM 系统通信覆盖范围性能

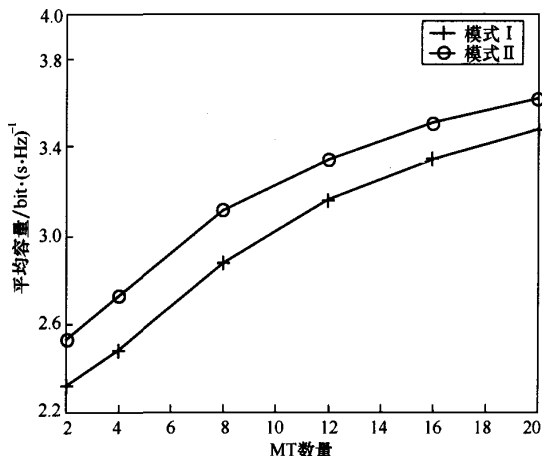


图 4 平均系统容量与 MT 数量的关系

5.3 G-VMIMO 系统的性能分析

不同环境下基于相同传输速率的 G-VMIMO 系统性能仿真被完成。仿真平台设计如下：采用 TDMA 和全双工 TDD 模式；AP 采用 2 根发送天线；任意 ST 均采用单天线；数据源采用 $1\text{bit}(\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$

(2根发送天线)的空时分组编码^[9]和 QPSK 调制。AP 与 ST 之间采用瑞利衰落信道模型,衰减系数取 0.4。ST 和 DT 之间采用 IEEE 802.15.3a 信道模型 CM3 (4~10m 范围非视距信道测量)。采用平均功率分配方案。AP 和 DT 之间直接连接的传输速率为 1Mbit/s。

图5显示了4种环境下 G-VMIMO 系统的性能。4种环境分别是:(1) AP 与 DT 直接通信;(2) DT 不仅通过自身的天线还通过共享两个 MT 的天线与 AP 通信(即 GT 包含 3 个 MT);(3) DT 还通过共享三个 MT 的天线与 AP 通信(即 GT 包含 4 个 MT);(4) DT 还通过共享 4 个 MT 的天线与 AP 通信(即 GT 包含 5 个 MT)。系统构成采用 4.1 小节中的方法,仿真中设定不同 ST 与 DT 的距离是相等的,ST 与 DT 之间的传输速率为 100Mbit/s,忽略 ST 中帧转换时延。

仿真结果显示在(2)、(3)和(4)环境下系统性能优于直接传输时的性能,原因是相对于其他环境,直接通信时路径损耗曲线下降更加急剧。图5的结果证明了 G-VMIMO 系统具有真实 MIMO 系统的性能。

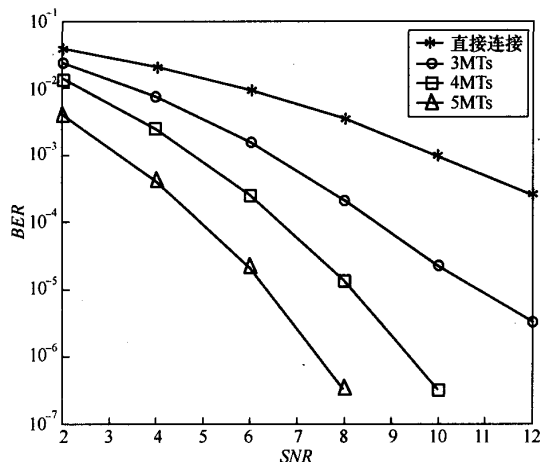


图5 BER vs SNR, $1\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 空时编码、2根发送天线、ST单天线

6 结论

本文提出一种全新的网络结构—G-VMIMO,它具有一些独特的优点,如容量增益、更高的网络结构配置灵活性和移动性等。仿真结果验证了 G-VMIMO 结构的可行性。文中提出了 G-VMIMO 系统构成的具体方法,并进一步对系统实现所面临

的难点进行了分析探讨。当前关于该课题更深入的研究工作仍在进行中。

参考文献:

- [1] TOH C K. A unifying methodology for handover RN of heterogeneous connections in wireless ATM networks[A]. ACM SIGCOMM[C]. 1997. 12-30.
- [2] CHANG R S, CHEN W Y, WEN Y F. Hybrid wireless network protocols [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(7): 1099-1109.
- [3] WIN M Z, SCHOLTZ R A. Impulse radio: how it works[J]. IEEE Common Lett, 1998, 2(1): 10-12.
- [4] Draft Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems-LAN/MAN Specific Requirements-Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPAN)[S].
- [5] TAO X f, NI L, WANG Y, ZHANG P. Novel cell infrastructure and handover mode[A]. 9th WWRF Meeting[C]. Zurich, Switzerland, 2003.310-315.
- [6] TAO X F, NI L, et al. Intelligent group handover mode in multicell infrastructure[A]. PIMRC[C]. Beijing, China, 2003. 621-626.
- [7] Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 TG3a (doc. 02/372r8)[S].
- [8] CHEN J H, et al. Near optimum universal belief propagation based decoding of low-density parity check codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(3):112-117.
- [9] TAROKH V, JAFARKHANI H, CALDERBANK A R. Space-time block coding for wireless communications: performance results [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(3): 451-460.

作者简介:



崔琪楠 (1979-), 女, 河南驻马店人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为超宽带技术、自组织网络。



余雯 (1983-), 女, 江西南昌人, 北京邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为超宽带技术。

(下转第 127 页)

TR 接收机。文中分别对这两种 TR 接收机的性能进行了详尽的理论分析，同时采用 IEEE 802.15.3a 的 UWB 室内多径信道模型 CM1、CM2 进行了仿真，结果表明：本文提出的改进 TR 接收机在比特误码率和数据传输效率方面，都优于基本 TR 接收机；其结构只比基本 TR 接收机稍复杂一些，在成本与性能之间取得了较好的平衡。下一步的工作，我们将对改进 TR 接收机在有符号间干扰（ISI）情况下的性能进行研究。

参考文献：

[1] CHOI J, STARK W. Performance analysis of RAKE receivers for ultra-wideband communications with PPM and OOK in multipath channels[A]. Proc IEEE ICC[C]. New York, USA, 2002. 1969-1973.

[2] HOCTOR R, TOMLINSON H. Delay-Hopped Transmitted-Reference RF Communications[A]. Proc IEEE UWBST2002[C]. Baltimore, USA, 2002. 265-270.

[3] CHAO Y, SCHOLTZ R. Optimal and suboptimal receivers for ultra-wideband transmitted reference systems[A]. Proc IEEE GLOBECOM[C]. San Francisco, USA, 2003. 759-763.

[4] CHOI J, STARK W. Performance of ultra-wideband communications with suboptimal receivers in multipath channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002,20(9): 1754-1766.

[5] ZACK R. Delivery D1.1: System Concept / Architecture Design and Communication Stack Requirement Document[R]. W01-02-0012-R08. European Commission IST ULTRAWAVES Project. 2002.

[6] SUSHCHIK M, et al. Performance analysis of correlation-based communication schemes utilizing chaos[J]. IEEE Transactions on

Circuits and Systems-I, 2000,47(12): 1684-1691.

[7] FOERSTER J, et al. Channel Modeling Sub-committee Report Final[R]. P802.15-02/490r1-SG3a. IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks. 2003.

作者简介：



杨刚（1972-），男，陕西咸阳人，西安交通大学博士生，主要研究方向为超宽带无线通信中的接收机设计、UWB 信号检测和信号处理技术。



亢洁（1973-），女，陕西潼关人，硕士，陕西科技大学讲师，主要研究方向为超宽带信号处理和数字图像处理技术。



施仁（1935-），男，上海人，西安交通大学教授、博士生导师，主要研究方向为数字信号处理和通信网络理论的工业应用。



张平（1959-），男，陕西汉中，人，博士，北京邮电大学教授，博士生导师，主要研究方向为 3G & B3G 移动通信技术等。

（上接第 121 页）



陶小峰（1970-），男，湖北宜昌人，博士，北京邮电大学副教授，主要研究方向为智能天线、空时码、群小区、超宽带技术。

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、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),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>