

基于分布式空时编码的异构协作通信系统介绍及 DMT 分析

张 鹏 王芙蓉

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘 要 协作通信可以在衰落无线环境中提供显著的性能增益。大多数研究协作通信的文献都假设每个节点只有一根天线或几根同样类型的天线。目前,具备异构通信接口的移动终端变得越来越普遍,所以有必要在蜂窝网络中深入地进行协作通信的相关研究。介绍了一种适用于异构协作系统的 VAA_DSTC 模式,并证明了其不仅可以获取满分集增益,而且移动终端异构通信接口间的数据率差异可以带来额外的复用增益。然后,重点分析了 VAA_DSTC 模式的分集复用折中(DMT)性能,并与其它类型的协作模式进行了比较。

关键词 协作通信,分布式空时编码,虚拟天线阵列,分集复用折中

中图法分类号 TN915

文献标识码 A

Introduction for Heterogeneous Cooperative Communication System and DMT Analysis Based on Distributed Space-time Coding

ZHANG Peng WANG Fu-rong

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Cooperative communication has been recently proposed as a way to provide dramatic gains in fading wireless environments. Most literatures about cooperative communication assume each node are equipped with only one interface or several homogeneous interfaces. To date, mobile terminals with heterogeneous interfaces become more popular, which motivate us to study cooperative communication in heterogeneous cellular networks. We introduced a VAA_DSTC scheme, which is suitable to heterogeneous cooperative communication system, and demonstrated that the data rate difference between heterogeneous interfaces can bring extra spatial multiplexing gain, in addition to diversity gain. Moreover, we characterized the diversity-multiplexing tradeoff of VAA_DSTC scheme and compared it with other schemes.

Keywords Cooperative communication, Distributed space-time coding, Virtual antennas arrays, Diversity-multiplexing tradeoff

无线信道的衰落特性是阻碍信道容量增加和服务质量改善的主要原因之一,分集技术是抑制信道衰落的一种较为简单有效的方法。分集是指在相互独立的路径上发送相同的数据,由于彼此独立的路径在同一时刻经历深度衰落的概率很小,因此在接收侧经过信号合并,信号的衰减程度就会减小。MIMO(multi-input multi-output)技术不仅能够应对衰落,提高传输的可靠性,而且在无线信道散射条件足够的情况下还可以获得复用增益,因此 MIMO 技术是下一代无线通信系统建议采用的必选技术之一。

1 协作通信技术概述

MIMO 技术要求同一设备上两根天线之间的距离最少为 $\lambda/2$, λ 为传输信号的波长。以通常采用的 2.4GHz 的频段为例,两根天线之间的距离至少为 6.125cm。这在很多情况下是不经济、不可行的,尤其是对于尺寸较小、功能单一的节点更是如此。而协作分集技术可以很好地解决这一问题^[1]。

在协作分集技术中,只具有单根天线的节点与其它节点共享彼此的天线,共同向目的节点发送数据。协作分集的工作过程包括两个主要的阶段:广播阶段和协作阶段。在广播阶段,源节点将要发送的数据进行广播,周围的中继节点都可以收到源节点发送的数据;在协作阶段,中继节点可以协助源节点将数据发送给目的节点。

在 MIMO 的相关研究中,可靠性由空间分集增益来衡量,反映了随着信噪比的增加误码率降低的速度;而数据率则由复用增益来衡量,反映了随着信噪比的增加数据率增加的速度。分集增益的提高一般要伴随着复用增益的降低。同理,复用增益的提高也要牺牲分集增益。分集复用折中(DMT; Diversity-Multiplexing Tradeoff)将分集增益和复用增益放在统一框架中进行研究,是衡量 MIMO 系统性能的有效工具^[2],也是衡量协作通信协议的重要手段^[3]。

目前,已经有大量的文献研究了协作通信技术在 ad-hoc 网络中的应用,而且大部分研究假定节点仅仅具备单根天线

到稿日期:2009-02-27 返修日期:2009-04-30 本文受国家自然科学基金(60572047)资助。

张 鹏(1976—),男,博士研究生,主要研究方向为协作通信,E-mail:zhangpeng_hust@gmail.com;王芙蓉(1966—),女,教授,博士生导师,主要研究方向为下一代移动通信网、移动性管理、通信软件等。

或多根同构的天线,但是协作分集在蜂窝网络中的应用并不多见。随着具备异构通信接口的移动终端变得越来越普及,研究协作通信在异构无线蜂窝网络中的应用就变得很有必要了。文献[4]提出了一种在蜂窝网中采用虚拟天线阵列的方案 VAA(virtual antenna array)。在该方案中,所有移动终端都具备两种接口:与基站通信的远距离通信接口,如 UMTS;移动终端彼此通信的短距离通信接口,如 WLAN。移动终端通过 WLAN 接口交换数据,同时共享彼此的 UMTS 接口,组成虚拟天线阵列,来获得额外的性能增益。但是文献[4]主要的工作是对 VAA 的信道容量及资源分配进行研究,没有涉及到具体的工作模式,也没有对其进行详细的性能分析。

在本文作者之前的工作中[6]提出了两种适用于 VAA 方案的工作模式:VAA_DSTC 和 VAA_BLAST。前者在组成虚拟天线阵列时采用了分布式空时编码(DSTC)的方法[5],可以获得最大的分集增益,但是不能获取复用增益;而后者则利用了 BLAST 方法[7],可以获取额外的复用增益,代价则是分集增益的损失。但是文献[6]中并未给出相应的证明。本文重点介绍 VAA_DSTC 的工作模式,并详细分析了该模式下的分集复用折中性能。

2 VAA_DSTC 模式介绍

在我们的研究中,假设所有移动终端都具备长距离通信接口 UMTS 和短距离通信接口 WLAN,而基站则具备两根 UMTS 天线。由于基站没有功率消耗和成本的考虑,因此这样的假设是可行的。我们称发送数据的移动终端为源节点 s ,协助 s 进行数据发送的移动终端为中继节点 r ,而基站则称为目的节点 d 。VAA_DSTC 方案包含两个主要的阶段:广播阶段和协作阶段,如图 1 所示。

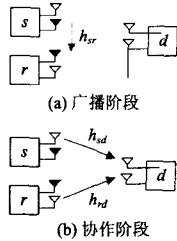


图 1 协作通信的两个主要阶段

在广播阶段中,源节点 s 通过 WLAN 接口把数据发送给中继节点 r ,如图 1(a)所示;而在协作阶段,源节点 s 和中继节点 r 一同采用分布式空时编码发送数据给目的节点 d ,如图 1(b)所示。

对于有 m 根发送天线、 n 根接收天线组成的 MIMO 系统而言,可以获取的最大分集增益和最大复用增益分别表示为 mn 和 $\min\{m, n\}$ [2],而这些指标可以看作是协作通信系统所能够达到指标的上界。在我们的例子中,由于在协作阶段,源节点和中继节点各自采用单根 UMTS 天线发送数据,因此可以看作 $m=2$;而目的节点 d 具备两根 UMTS 天线,可以看作 $n=2$ 。所以不考虑广播阶段的影响,VAA_DSTC 可以获取的最大分集增益和复用增益分别为 4 和 2。但也正是由于广播阶段产生了额外的开销,因此实际取得的最大分集增益和复用增益会有所减少。在接下来的分析中,假设源节点 s 发送 x_1 和 x_2 两个数据给目的节点 d 。这里假设有两个数据只是为了描述的清晰,在实际使用中可以以数据块为单位进行协

作,这样可以减少协作带来的开销。为了方便比较,同时给出了不经中继节点进行协作的直传方案。用 R_w 来代表 WLAN 接口的数据率, R_U 来代表 UMTS 接口的数据率,通常 R_w 会比 R_U 大一个数量级以上。图 2 给出了 VAA-DSTC 模式的工作过程。

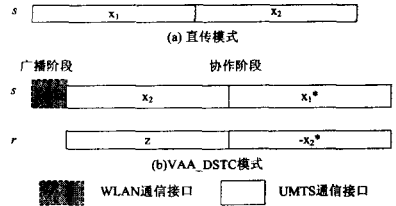


图 2 VAA_DSTC 模式的工作过程

3 AA_DSTC 模式的 DMT 性能分析

在开始分析之前,首先介绍了一些基本概念,详细的内容可以参考文献[2]。

空间分集的基本原理是利用两个及两个以上链路传送同一信息,并且这些链路的衰落相互独立。在接收端以适当的方式将这些信号合并起来加以利用,从而恢复出原始信息。空间复用是将相互独立的不同信号在同一无线信道中并行传送,即信号的发送采用不同的发送天线,在接收端采用多根天线及合适的信号处理技术把这些相互耦合的信号分离出来。分集增益可以用来表示系统的可靠性,而复用增益则用来表示系统的数据率。分集增益可以用式(1)来表示:

$$d = - \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log P_e(SNR)}{\log SNR} \quad (1)$$

复用增益可以用式(2)来表示:

$$r = \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log R(SNR)}{\log SNR} \quad (2)$$

其中, $P_e(SNR)$ 表示信噪比为 SNR 时的错误概率, $R(SNR)$ 则表示信噪比为 SNR 时可以获取的数据率。又由于错误概率通常由中断概率来决定,中断概率定义为信道的平均互信息量低于所需要达到的数据率的概率,因此在分集增益的表达式中用中断概率 $P_{out}(SNR)$ 来代替 $P_e(SNR)$ 。式(1)可以写成:

$$d = - \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log P_{out}(SNR)}{\log SNR} \quad (3)$$

式(4)给出了中断概率 $P_{out}(SNR)$ 的表达式:

$$P_{out}(SNR) = P[I < R(SNR)] \quad (4)$$

接下来,为了描述的方便,沿用文献[2]中的指数相等概念,并用符号 $\doteq$ 表示。例如 $f(SNR) \doteq SNR^b$ 可以用来表示:

$$\lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{\log f(SNR)}{\log SNR} = b$$

而式(3)可以表示为:

$$P_{out}(SNR) \doteq SNR^{-d} \quad (5)$$

在 VAA_DSTC 模式中,由于只有源节点 s 和一个中继节点 r 参与协作,采用典型的 2×2 的 Alamouti 空时编码可以满足要求。接收节点 d 处的接收信号可以表示为:

$$Y = \sqrt{\frac{SNR}{2}} H \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix} + W \quad (6)$$

同时假定接收侧采用最大似然解码方案,那么等效的相关衰落信道可以表示为:

$$y_i = \sqrt{\frac{\text{SNR} \|H\|_F^2}{2}} x_i + w_i, i=1,2 \quad (7)$$

其中, H 代表 2×2 的无线传输信道, $\|H\|_F$ 代表信道 H 的 Frobenius 范数, 而 $\|H\|_F^2$ 服从自由度为 $2mn$ 的 χ^2 分布。对于较小的数值 ϵ , 可以得到^[2]:

$$P(\|H\|_F^2 \leq \epsilon) \approx \epsilon^{nm} \quad (8)$$

而式(7)可以获取的信道容量为 $\log(1 + \text{SNR} \|H\|_F^2/2)$ 。但是考虑到整个数据传输是由广播阶段和协作阶段两个阶段共同完成的, 根据前面的假设, 共有 x_1 和 x_2 两个数据被发送。在广播阶段, 源节点 s 通过 WLAN 接口, 采用速率 R_w 完成两个数据发送, 所耗费的时间为 $2/R_w$ 。而在协作阶段, 源节点 s 和中继节点 r 采用 R_U 的速率, 通过分布式空时编码将数据传递给目的节点 d , 所耗费的时间可以表示为 $2/R_U$ 。由于仅仅是协作阶段进行了有效的数据传递, 因此协作阶段耗费的时间占总传输时间的比例可以用下式来表示:

$$\frac{\frac{2}{R_U}}{\frac{2}{R_w} + \frac{2}{R_U}} = \frac{R_w}{R_w + R_U} \quad (9)$$

所以, VAA_DSTC 可以获取的信道容量表示为:

$$\frac{R_w}{R_w + R_U} * \log(1 + \text{SNR} \|H\|_F^2/2) \quad (10)$$

而在数据率为 $R = r \log \text{SNR}$ 情况下可以获取的中断概率为:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}(\text{SNR}) &= P\left(\frac{R_w}{R_w + R_U} * \log\left(1 + \frac{\text{SNR} \|H\|_F^2}{2}\right) < r \log \text{SNR}\right) \\ &= P\left(\log\left(1 + \frac{\text{SNR} \|H\|_F^2}{2}\right) < \frac{R_w + R_U}{R_w} r \log \text{SNR}\right) \\ &= P\left(\left(1 + \frac{\text{SNR} \|H\|_F^2}{2}\right) < 2^{\frac{R_w + R_U}{R_w} r \log \text{SNR}}\right) \\ &\approx P\left(\frac{\text{SNR} \|H\|_F^2}{2} < 2^{\frac{R_w + R_U}{R_w} r \log \text{SNR}}\right) \\ &= P\left(\frac{\text{SNR} \|H\|_F^2}{2} < \text{SNR}^{\frac{R_w + R_U}{R_w} r}\right) \\ &\triangleq P\left(\|H\|_F^2 < \text{SNR}^{-\left(1 - \frac{R_w + R_U}{R_w} r\right)}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

利用式(8)的结论, 可以得到 $P_{\text{out}}(\text{SNR})$ 的最终表达式为:

$$P_{\text{out}}(R) \triangleq \text{SNR}^{-nm} \left(1 - \frac{R_w + R_U}{R_w} r\right)^+ \quad (12)$$

比较式(12)和分集增益的表达式(5), 可以得到:

$$d(r) = mn \left(1 - \frac{R_w + R_U}{R_w} r\right)^+ \quad (13)$$

式(13)表示了分集增益和复用增益的关系, 也就是所谓的分集复用折中(DMT)。在我们的应用场景中 $m=2, n=2$, 同时假定 R_w 取值为 10Mbps, 而 R_U 的取值为 1 Mbps, 则式(13)可以表示为:

$$d(r) = 4 \left(1 - \frac{11}{10} r\right)^+ \quad (14)$$

从式(14)可以看出, 当复用增益 r 取值为 0 时, 可以获得满分集增益 4; 而当分集增益 d 为 0 时, 可以获取的复用增益为 10/11。对于 m 和 n 取其它值的情况都可以根据式(13)计算出相关的分集复用折中性能。

4 实验与分析

图 3 给出了当 $m=2, n=2$ 时, VAA_DSTC 模式所能获取的分集复用折中。图中不仅比较了节点 s 和目的节点在直传模式下和 VAA_DSTC 工作模式下的分集复用折中性能,

还标明了上边界以及当源节点和目的节点只具备单根长距离天线的情况下进行协作所能够达到的分集复用折中性能。

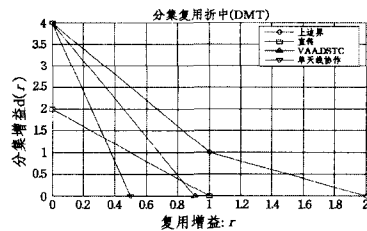


图 3 VAA_DSTC 模式下的分集复用折中性能

从图 3 的结果可以看出, 直传模式不能获得高于 2 的分集增益(直传模式可以获得分集增益 2 的主要原因在于目的节点具备两根接收天线, 采用了接收分集的结果), 但是可以获得最大为 1 的复用增益。单天线协作模式可以获取满分集增益 4, 但是只能获得 0.5 的复用增益, 只是直传模式的一半; 而 VAA_DSTC 模式不仅可以获取满分集增益 4, 而且能够获得接近于 1 的复用增益。这是由于通过 WLAN 接口的高速数据传输, 压缩了广播阶段的传送时间, 因此复用增益得到了显著提高。

结束语 除了可以获取额外的复用增益, VAA_DSTC 还有其它的优点: 在广播阶段, 源节点通过 WLAN 接口发送数据给中继节点, 与此同时, 目的节点仍然可以接收其它节点的发送数据, 这样可以更加有效地利用频率资源。同时, 传统的协作通信领域广泛存在的节点之间传输数据不同步问题, 在 VAA_DSTC 中也被解决。非同步问题主要包括两种情况: 1) 源节点和中继节点向目的节点发送数据时并不同步; 2) 源节点和中继节点到目的节点的距离不同, 信道条件也不一致。即使同时向目的节点发送数据, 两组数据到达目的节点的时间也不相同, 这会给目的节点正确解码数据带来很大的困难。而在 VAA_DSTC 中, 由于目的节点通常指基站设备, 处于中心的地位, 会通过 UMTS 接口周期性地向覆盖范围内的所有节点发送广播信息, 源节点和中继节点可以随时与目的节点进行同步。这可以保证源节点和中继节点会在同一时刻发送数据。另外, 由于所有源节点和中继节点定义采用 WLAN 接口进行通信, 彼此距离接近, 从源节点和中继节点到目的节点的距离和信道条件可以视为基本相似, 传输时间可以视为相同。

另外, 由于基站的中心地位, 很多协作通信中的问题, 如协作协议及协作节点的选择、无线资源的分配等, 都变得更加容易实现。因此, 协作通信在蜂窝网中的应用更加易于实现, 应该引起足够的重视。还要注意的, 不仅移动设备可以通过彼此协作来提高无线通信的质量, 多个基站之间也可以通过彼此协作来获得宏分集增益。可以说, 研究协作通信在异构蜂窝网中的应用仍然处于探索阶段。

参考文献

- [1] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080
- [2] Lizhong Z, Tse D N C. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(5): 1073-1096

(下转第 169 页)

在的冲突进行了消解,其总结如表 2 所列。

表 2 冲突消解

采取的措施	消解的冲突
执行器	物理冲突
定义视图, 并映射到局部本体	字段结构冲突、字段命名冲突、记录标识冲突、 表命名冲突、表结构冲突
全局本体	字段命名冲突、表结构冲突、表关系冲突、共享语义冲突
调解器	字段类型冲突、字段长度冲突、字段精度冲突、 字段计量单位冲突、字段表达方式冲突

每个执行器对应一个独立的数据源,它接收查询请求,结合共享数据的视图定义,进行具体的查询操作。不管各信息系统采取什么样的方式存储、管理数据,无论是关系型数据库、XML 文件,或者其它任何方式,由执行器分别采用不同技术和底层数据管理系统进行交互。但执行器对外提供统一、透明的接口,这样就消解了不同数据源在数据处理上存在的物理冲突。

为共享数据单独建立视图,并将其 schema 映射到局部本体。针对字段结构冲突的第一种情况,可以在定义视图时利用自定义字段方法产生新字段,从而消除冲突。针对字段结构冲突的第二种情况,结合视图的定义,将这一特征统一用视图来表示,外键关系用本体中的对象属性来表达。在定义视图和本体时,采用重命名方法消解字段命名冲突和表命名冲突。利用 OWL 的 sameAs 构造子,指明记录间的等价关系,从而消除记录标识冲突。对于表结构冲突,即表达相同概念的不同表具有不同的字段集,可以抽象出它们的共性部分,在定义本体的时候将共性部分转换为父概念,各表对应于它的子概念。

全局本体包含有各局部本体共享的公共词汇,以及局部本体和公共词汇之间、局部本体词汇彼此之间的关系。利用 OWL 的 subClassOf, equivalentClass, subPropertyOf, equivalentProperty 等构造子,可以表达清楚各概念、属性之间的关系,消解冲突。在构造全局本体的过程中,对语义一致的概念、属性,可以用等价关系来描述;对语义有差异,但有共同基础的概念、属性,可以抽象出共同部分作为父概念或父属性,相关内容作为子概念或子属性。各局部本体尽可能和全局本体建立联系,利用全局本体实现局部本体间的映射。

对于可以通过简单计算、变换来消解的冲突,总结、细化其类型,得到冲突因子,并建立消解冲突的因子方法库。设计了元本体来描述局部本体中受限属性具备的冲突因子。用户

查询请求中,受限属性具有的冲突因子描述了一次数据中哪些数据的语义需要进一步明确,用户线索指明了对这些数据期望。调解器将两者进行匹配,应用因子方法库的函数对一次数据进行转换,就消解了这类冲突。

应用上述方案,可以解决绝大多数冲突,但仍有少量冲突没办法消解。比如记录的内容冲突,从两个不同的数据源可能得到同一个人“张三”的年龄分别为 30 和 40,这是由数据源的数据质量造成的,可以通过手工的方式去调整。

结束语 本文对信息集成中可能遇到的冲突进行了总结、分析,并基于语义技术,设计了解决方案,较好地消解了各个层次的冲突。在进行语义信息集成时,目前最大的困难在于如何在海量数据上进行语义处理。将业务数据静态转换为本体中的实例,现有的 DL 推理机如 Pellet, Racer 等都无法对海量数据进行推理;Oracle 11g spatial 虽然有强大的处理能力,且最大能支持 OWL Prime,但它只支持本地推理,而且要求所有待处理的数据都要进入它的 model,所以无法处理分散的数据库。如果将分散的数据静态导入一个数据库,有可能带来数据重复存储及衍生问题。所以面对异质异构的信息系统,目前常见的方法是将语义查询重写为 SQL 语句,但都只支持 OWL 的部分构造子,算法不一样,支持的数量也不相同。这对充分应用语义技术进行信息集成有一定的影响,今后可以在这方面做进一步研究。

参 考 文 献

[1] 李瑞轩,卢正鼎. 多数据库系统原理与技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005

[2] 王洪伟,伊磊,张元元. 本体模型的逆向获取研究[J]. 计算机科学,2007,34(2):166

[3] 许卓明. 从 ER 模式到 OWL DL 本体的语义保持的翻译[J]. 计算机学报,2006,29(10):1786

[4] Sudha RAM, Jinsoo PARK. Semantic conflict resolution ontology(SCROL): an ontology for detecting and resolving data and schema-level semantic conflicts [J]. IEEE Transaction on Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions, 2004, 16 (2):189-202

[5] Cruz I F, Xiao Huiyong. Ontology Driven Data Integration in Heterogeneous Networks[C] // Complex Systems in Knowledge-based Environments: Theory, Models and Applications. Berlin:Springer Berlin / Heidelberg,2008:75

(上接第 113 页)

[3] Azarian K, El Gamal H, Schniter P. On the achievable diversity-multiplexing tradeoff in half-duplex cooperative channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(12):4152-4172

[4] Dohler M. Virtual antenna arrays[D]. King's College London, Univ. London, London, U. K. , 2003

[5] Laneman J N, Wornell G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks

[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2415-2425

[6] Zhang Peng, Wang Furong, Tu Lai, et al. Performance Analysis and Diversity-Multiplexing Tradeoff in Virtual Antenna Array [C]//Proceedings of FGCN. Hainan, China, 2008

[7] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Bell Labs Tech. J. , 1996, 1(2):41-59