

BC 单播与 BC 多播并存的多用户网络分析

于振超 刘 锋 曾连荪

(上海海事大学信息工程学院 上海 201306)

摘 要 提出一种多用户 BC 单播与 BC 多播并存的网络模型以及结合零空间交的迫零干扰消息的新方法,该模型的主网采用“循环模式”为接收端分配期望消息,以构成多播网络;次网采用“一发多收”为接收端分配期望消息,以构成单播网络。该迫零方法首先根据接收端的干扰消息获取对应的零空间,再取多个零空间的交空间,最后将多个干扰消息同时置于对应的交空间中,即可实现在每个接收端同时迫零多个干扰消息。对于该多用户系统,分析得到了最优天线配置方案及系统复用增益的一般化结果。采用 Matlab 对系统进行仿真分析,结果表明系统复用增益的理论值与仿真结果相一致。

关键词 BC,迫零,多播,单播,空间复用增益,零空间的交

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.023

Multi-user Network Analysis of BC Unicast and BC Multicast Coexistence

YU Zhen-chao LIU Feng ZENG Lian-sun

(School of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract A new method of multi-user BC unicast and BC multicast coexistence was proposed, and a new method of zero-space interference was proposed. The main network of the model uses “loop mode” to allocate the expected message to the receiving end to form the multicast network. The secondary network uses the “one-over-one” to allocate the desired message to the receiving end to constitute an unicast network. The forcing zero method first obtains the corresponding zero space according to the interference message of the receiving end, and then takes a number of intersection space of zero space. Finally, multiple interference messages are placed in the corresponding intersection space at the same time, achieving more than one forcing zero interference message at each receiving end. For this multiuser system, the generalized results of optimized antenna configuration scheme and the reuse gain of the system are obtained. The system was simulated through Matlab. The results show that the theoretical value of the system reuse gain is consistent with the simulation results.

Keywords Broadcast channel, Zero forcing, Multicast, Unicast, Space reuse gain, Nullspace intersection

1 介绍

众所周知,采用空间复用技术(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)在两条独立的链路中传输不同的数据码流,可以成倍地提高数据的吞吐量。但是尽管如此,使用 MIMO 技术的系统仍然受到消息之间的相互干扰,从而影响系统性能。对无线网络系统容量的研究是十分困难的,因此考虑从另一个角度——空间复用增益来衡量系统的容量大小。空间复用增益^[2]技术是在发射端将数据流分成多个平行的子数据流,并在同一频带上使用不同的天线将其同时发射,充分利用空间传播的多径分量。但它不能通过无限制地增加天线的数量来增加多径分量。由于当前天线集成技术的限制,只能在收发端配置合理的天线数来提高系统的天线效率。

目前已有较多有关 MIMO 单网^[1-3]的研究,但是有关单

播与多播并存网络的研究相对较少。现代多媒体技术的发展给无线通信提出了更高的要求,其需要提供更多的信道容量来满足传输的需要。由于 Broadcast Channel^[4](BC)广播信道的特点,即其既能满足广播传输的需要又能提高系统的空间复用增益,因此使纯多播 BC 信道与 BC 单播信道并存组成多网模型。文献[5,7]提出了多播的概念,并导出网络的可达区域以及外界,结合多播的模型改善了系统的频谱和能量效率;文献[8-9]介绍了一种在移动系统中可伸缩视频编码的传输方案,可改善个人用户的信道质量。在 MIMO 网络中^[10],空间复用增益主要受到干扰的影响,尤其是多播网络,干扰消息主要来自网络内部和网络之间,因此研究对多播网络的干扰进行处理并获得更大的空间复用增益是非常必要的。处理干扰的方法有多种,如干扰中和、干扰对齐和迫零等,本文提出结合零空间^[11]交的迫零方案来实现消除干扰。

到稿日期:2017-09-01 返修日期:2017-12-08 本文受国家自然科学基金项目(61271283),上海教委科研创新项目(14YZ113)资助。

于振超(1992-),男,硕士生,主要研究方向为 MIMO 无线通信;刘 锋(1976-),男,博士,讲师,主要研究方向为 MIMO 无线通信,E-mail: liufeng@shmtu.edu.cn(通信作者);曾连荪(1968-),男,博士,教授,主要研究方向为无线定位。

本文主要研究的是单播与多播并存的 BC 网络的空间复用增益,这是一种新的广播信道模型。本文的模型主网采用“循环模式”^[3]为每个接收端分配期望消息,次网采用“一发多收”为每个接收端分配期望消息,同时采用结合零空间交的迫零方案,将同一个接收端的多个干扰消息置于对应零空间的交空间中,以实现同时迫零多个干扰消息。最后,本文给出了模型的天线最优配置方案以及一般化的空间复用增益结果,并且使用 Matlab 对系统进行了仿真分析,验证了模型的正确性及方案的可行性。

2 系统模型

本文研究的 BC 单播与 BC 多播并存的系统模型如图 1 所示。

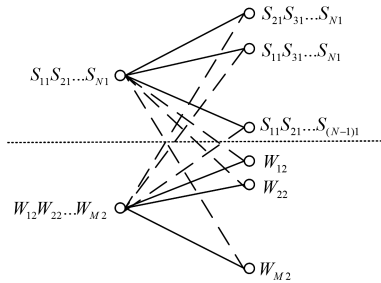


图 1 BC 单播与 BC 多播并存的系统模型

Fig. 1 System model of BC unicast and BC multicast coexistence

图 1 中,从上到下^[12-13],虚线上方发送 S 类消息的为 主网,虚线下方发送 W 类消息的为次网。主网的发送端发送 N 个消息,每个接收端接收 N-1 个期望消息、1 个来自主网的干扰消息以及 M 个来自次网的干扰消息。由于在主网的每个接收端都存在 M+1 个干扰消息,因此考虑使用某种方法,消除接收端的 M+1 个干扰消息。同理,次网的每个接收端接收 1 个期望消息和 M+N-1 个干扰消息,同时也要消除次网接收端的 M+N-1 个消息。这里考虑使用本文提出的迫零方案——零空间交,使接收端的干扰消息全部迫零,以消除干扰消息。

对次网和主网的期望消息和干扰消息进行简要说明:主网发送 $\{S_{11}, S_{21}, \dots, S_{N1}\}$ 共 N 个消息。接收端 1 共接收到 M+N 个消息,其中包含 N-1 个期望消息,分别是 $\{S_{21}, S_{31}, \dots, S_{N1}\}$,其他都是干扰消息;接收端 2 共接收到 M+N 个消息,其中包含 N-1 个期望消息,分别是 $\{S_{11}, S_{31}, \dots, S_{N1}\}$;主网的其他接收端情况以此类推。次网发送 $\{S_{12}, S_{22}, \dots, S_{M2}\}$ 共 M 个消息。接收端 1 共接收到 M+N 个消息,其中包含 1 个 S_{12} 期望消息,其他都是干扰消息;次网的其他接收端以此类推。

针对接收端信号,本文提出的模型采用“循环模式”,对于发送端信号 $\{S_{11}, S_{21}, \dots, S_{N1}\}$,将 S_{11} 发送给除第一个接收端的其余接收端,将 S_{21} 发送给除第二个接收端的其余接收端,以此类推,即可得到本文提出的“循环模式”系统模型。

本文提出的单播与多播并存的 BC 网络的系统模型的输入输出关系为:

$$Y_i = H_{i1}S_1 + H_{i2}W_2 + Z_i \quad (1)$$

其中, Y_i 表示第 i ($i=1, 2, \dots, M+N$) 个接收端所接收的信

号; S_1 表示主网 BC 信道发送端发送的信号; W_2 表示次网 BC 信道发送端发送的信号; H_{i1} 表示从主网发送端到第 i 个接收端的信道矩阵, H_{i2} 表示从次网发送端到第 i 个接收端的信道矩阵; Z_i 表示第 i 个接收端接收的加性高斯白噪声^[14],假设其均值为 0,方差为 σ^2 。

针对本文的系统模型^[12,15],提出空间复用增益的定义:多播网络系统的空间复用增益是系统接收端解码消息的总数。单播网络系统的空间复用增益定义为:发送端有 P 根天线,接收端的天线数分别为 Q_1, \dots, Q_K ,空间复用增益为 $\min(P, \sum_{i=1}^K Q_i)$ 。空间复用增益是判定系统模型性能优劣的一个重要指标,根据多播系统模型的空间复用增益大小,可间接衡量系统容量大小。另外,给出天线效率(E)的定义:空间复用增益(r)与系统所用收发天线数总数(n)的比值,即:

$$E = \frac{r}{n} \quad (2)$$

根据系统的天线效率,可间接衡量系统的天线利用率,这也是判定系统模型性能优劣的另一个重要指标。

3 方案分析与设计

针对本文提出的系统模型,采用结合零空间交的迫零方案,分析如何从带有干扰消息的信号中解码出期望消息,同时得到系统的自由度大小。为了便于分析,先从 3 用户模型开始向一般模型进行逐步分析。3 用户 BC 单播与 BC 多播并存的系统模型如图 2 所示。

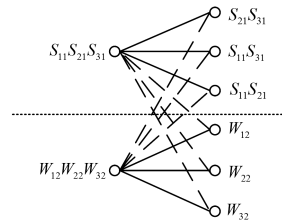


图 2 3 用户 BC 单播与 BC 多播并存的系统模型

Fig. 2 System model of 3 user BC unicast and BC multicast coexistence

3.1 N=3, M=3

由于主网的 BC 信道的最少用户数为 3,因此先对 3 用户 BC 纯多播信道并存 3 用户 BC 单播信道进行系统模型分析。根据纯多播中的“接收几个有效消息配几根天线”的原则,对主网 BC 纯多播信道的每个接收端配置 2 根天线,发送端的天线数为未知的 M_1 根,发送端发送 3 个多播消息 S_{11}, S_{21}, S_{31} ,并且每个多播消息是发送给本网络内的 2 个接收端。对次网 BC 单播信道的每个接收端配置 1 根天线,发送端的天线数同样为未知的 N_1 根,每个发送端发送 1 个单播消息。由此,可以得出每个接收端的接收信号为:

$$Y_i = H_{i1}S_1 + H_{i2}W_2 + Z_i \quad (3)$$

其中, Y_i 表示第 i ($i=1, 2, \dots, 6$) 个接收端所接收的信号, S_1 表示主网 BC 信道发送端发送的信号, W_2 表示次网 BC 信道发送端发送的信号, H_{i2} 表示从 W_2 发送端到第 i 个接收端的信道矩阵。

现在对发送端的信号进行线性预编码处理,在每个发送

端通过设计一个预编码矢量矩阵 F 使接收端的信号干扰迫零,从而可以在接收端得到期望信号。经过预编码后的每个接收端接收到的信号为:

$$Y_i = H_{i1}F_1S_{i1} + H_{i2}F_2W_2 + Z_i \quad (4)$$

其中, F_i 表示第 i 个发送端的预编码矩阵。

该模型采用迫零方法来处理干扰消息,从而解码出期望消息。具体地,主网 BC 第一个接收端接收到的期望信号是 S_{21} 和 S_{31} ,而 S_{11}, W_{12}, W_{22} 和 W_{32} 是干扰信号;BC 其他的接收端与之类似。对于次网 BC 的第一个接收端在接收到期望消息 W_{12} 后,还接收到来自 BC 发送端的 5 个干扰消息,即 $S_{11}, S_{21}, S_{31}, W_{22}, W_{32}$ 。因此,对于 S_{11} 这个干扰消息,应该将其置于信道 $H_{11}, H_{41}, H_{51}, H_{61}$ 的零空间的交空间中。

首先给出零空间的交引理^[16]。

引理 1 给定两个矩阵 $A \in C^{m \times n}$ 和 $B \in C^{g \times n}$,若令 $C =$

$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \in C^{(m+g) \times n}$,则 $Cx=0 \leftrightarrow Ax=0$ 和 $Bx=0$,即 C 的零空间的交空间 $Null(C) = Null(A) \cap Null(B)$ 。

由引理 1 得出信道矩阵的零空间的性质。设 $(m+g) \times n$ 的矩阵 C 的秩为 $r = rank(C)$,因为至少存在一个零空间的交,所以 $n-r \geq 1$ 。但是已知 C 是满秩的,有 $r = \min(m+g, n)$,由此可以推导出 $r = m+g$ 。综上,可以得到零空间的交空间性质为:

$$n \geq m+g+1 \quad (5)$$

并且,若矩阵 C 的秩为 $r = rank(C)$,则它的右奇异向量 $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 中,与 $n-r$ 个零奇异值对应的右奇异向量 $\{V_{r+1}, V_{r+2}, \dots, V_n\}$ 构成零空间的交空间 $Null(A) \cap Null(B)$ 的标准正交基。

由引理 1 可以得到 S_{11} 的零空间的交空间 $Q_1 = [H_{11}; H_{41}; H_{51}; H_{61}]$ 。同理也可以得到主网其他零空间的交空间 $Q_2 = [H_{21}; H_{41}; H_{51}; H_{61}]$, $Q_3 = [H_{31}; H_{41}; H_{51}; H_{61}]$,维度均为 $5 \times M_1$ 。并且由引理 1 还可以得到 $M_1 = 6$ 。

对于次网 W_{12} 的零空间的交 $Q_4 = [H_{12}; H_{22}; H_{32}]$,维度为 $6 \times M_2$ 。同理,由引理 1 可以得到 $M_2 = 7$ 。次网 BC 的其他接收端的零空间的交与之相同,其零空间的交空间 $Q_5 = [H_{12}; H_{22}; H_{32}]$,维度为 6×7 , $Q_6 = [H_{12}; H_{22}; H_{32}]$,维度为 6×7 。

由零空间的交空间可以设计主网 BC 发送端的预编码矢量 $f_{11} \in Null(Q_1, Q_2, Q_3)$,再对 $Q_i (i=1, 2, 3)$ 进行奇异值分解, $Q_i = U_i \Sigma_i V_i^H$ 。由引理 1 可知 Q_i 的秩 $r=2$,它的右奇异向量 V_1 和 V_2 中,与 1 个零奇异值对应的右奇异向量 V_2 构成零空间的交空间的标准正交基。因此可得知预编码矢量满足条件: $f_i = V_i^2 (i=1, 2)$,表示取矩阵 V_i 的第 2 列。由此,可以得到主网 BC 发送端的预编码矩阵 $F_1 = [f_{11} f_{21} f_{31}]$ 。同理可以得到次网 BC 的发送端预编码矢量 $f_{12} \in Null(Q_4, Q_5, Q_6)$,对 Q_4, Q_5, Q_6 进行奇异值分解。它的右奇异向量 $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ 中,与 1 个零奇异值对应的右奇异向量 V_6 构成零空间的交的标准正交基。因此,可得知预编码矢量满足条件: $f_i = V_i^6 (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$,表示取矩阵 V_i 的第 6 列。进而得到次网 BC 的发送端的预编码矩阵为 $F_2 = [f_{12} f_{22} f_{32}]$ 。综上,可以得到 $N=3, M=3$ 模型的空间复用增益是 9。

3.2 N 用户, M 用户

上文介绍了 3 用户多播 BC 信道并存 3 用户单播 BC 信道,它们的天线配置都是假设的,下面着重分析一般情况下发送端、接收端天线的配置方案和系统的空间复用增益,这也相当于验证上文中天线配置的合理性,理论分析配置依据。

3.2.1 最佳天线配置

每个接收端的天线数等于其得到的期望消息数。下面主要分析发送端天线数的最优配置。

定理 1 对于 N 用户 BC 纯多播并存 M 用户 BC 单播网络系统,主网 BC 的发送端发送 N 个多播消息,并且将每个多播消息发送给主网内的 $N-1$ 个接收端,给主网 BC 每个接收端配置 $N-1$ 根天线。次网 BC 的每个发送端发送一个单播消息,次网 BC 的每个接收端配置 1 根天线。在这种条件下,主网 BC 发送端的最优天线配比是 $(M+N)$ 根,次网 BC 的发送端的最优天线配比是 $(N^2 - N + M)$ 根。

证明:以主网的第一个用户和次网的第一个用户为例进行分析,主网 BC 发送端发送的信号 S_{11} 被本网络内的 $N-1$ 个接收端接收,对于剩下的 1 个接收端和 M 个次网的接收端而言, S_{11} 是干扰信号,因此可以将其置于其信道零空间的交中,其零空间的交的维度为 $(M+N-1) \times M_1$,故由引理 1 可得 $M_1 = M+N$ 。同样可以分析 BC 的第一个用户发送的信号 W_{12} 只对于本网络的第一个接收端是期望信号,对于其他的 $M-1$ 个接收端是干扰信号,并且对于主网的 N 个接收端也都是干扰信号,因此可得 W_{12} 的零空间的交空间维度为 $(N^2 - N + M - 1) \times N_1$,同样由引理 1 可得 $N_1 = N^2 - N + M$ 。并且次网 BC 网络的其他用户的天线数与之相同。

3.2.2 干扰处理分析

本节研究接收端的干扰消息处理。这里采取接收端迫零的方法,其关键在于将干扰消息置于零空间的交空间,以保留期望消息。具体分析如下:假设主网 BC 发送端的预编码矩阵 $F_1 = (f_{11} f_{21} \dots f_{N1})$ 。可以得到 S_{11} 的零空间的交 $Q_1 = [H_{11}; H_{(N+1)1} \dots H_{(M+N)1}]$,并且可以得到其他主网发送消息的零空间的交 $Q_N = [H_{N1}; H_{(N+1)1} \dots H_{(M+N)1}]$,维度为 $(M+N-1) \times M_1$ 。然后对 Q_N 进行 SVD 分解, $Q_N = U_N \Sigma_N V_N^H$ 。依据引理 1 以及定理 1 可知 Q_N 的秩为 $(N-1)$ 。其右奇异向量 $V_i (1, 2, \dots, N-1)$ 中,与 $N-r$ 个零奇异值对应的右奇异向量 V_{N-1} 构成公共零空间的标准正交基。因此,可得预编码矩阵 F_1 的关系: $f_i = V_i^{N-1} (i=1, 2, \dots, N-1)$ 表示取矩阵 V_i^{N-1} 的第 $N-1$ 列。对次网的每个发送端的预编码矩阵的分析与之类似,不再赘述。最后,通过定理可以得到系统的空间复用增益为 $N^2 - N + M$ 。通过以上分析,可以合理地设计发送端的预编码矩阵,进而每个接收端可以解码出期望消息同时消除干扰消息。

3.2.3 复杂度分析

依据上文的配置方案及干扰处理,对系统的复杂度展开分析。根据矩阵理论可知:对于矩阵的秩为 r 的 $m \times n$ 的矩阵 A ,对矩阵 A 进行 SVD 分解或求广义逆,其复杂度为 $O(mnr)$;同时,对于 $m \times n$ 的矩阵 A 和 $n \times p$ 的矩阵 B ,两者相乘的复杂度为 $O(mnp)$ 。

首先分析发送端的复杂度。构成零空间的交的维度为 $(M+N-1) \times M_1$,对该组合矩阵进行 SVD 分解,可以得到每

个发送消息对应的预编码矢量的计算过程的复杂度为 $O(N^2(N+M))$ 。又因为主网 BC 发送端发送 N 个有效消息,所以主网发送端的复杂度为 $O(N^3(N+M))$ 。同理,可得 M 个用户的 BC 次网的复杂度为 $O(N^4M)$ 。整个系统发送端的复杂度为:

$$C_T = O(N^4M) \quad (6)$$

然后分析接收端的复杂度。在每个接收端通过使用 $H_N F$ 的广义逆来实现线性编码方案,其中在 BC 主网中的 H_N 的维度为 $(N-1) \times M_1$, F 的维度为 $M_1 \times N$ 。因此, H_N 与 F 相乘的复杂度为 $O((N-1)M_1N)$ 。再对 $H_N F$ 进行广义逆计算,其复杂度为 $O((N-1)^2M_1N)$ 。因此,主网接收端的复杂度为 $O(MN^4 + N^5)$ 。同理,可以得到次网接收端的复杂度为 $O(2N^2M)$ 。因此,系统接收端的复杂度为:

$$C_R = O(N^4M + N^5) \quad (7)$$

对于整个系统而言,系统总的复杂度为 $C = C_T + C_R$,将其代入式(7),经过整理可以得到系统复杂度为:

$$C = O(N^4(N+2M)) \quad (8)$$

4 仿真与分析

依据前面的方案分析,本节使用 Matlab 对系统网络模型进行了仿真分析。本节仿真了 5 种情况下 MIMO 信道的空间复用增益以及天线效率。仿真平台为 Matlab,仿真中信道为瑞利衰落信道,信道衰落系数服从标准正态分布。每个用户有相同的发射功率和噪声功率,每个数据流采用等功率分配,每个仿真点运行 10 万次。

4.1 系统的空间复用增益

首先假设每个信道为不相关的瑞利衰落信道,发送端的功率为 P ,发送端在满足总功率有限的条件下,对每个用户的发送功率进行平均分配。每个用户接收端的噪声方差都相同且设为 σ^2 。假设每个发送端可获知它所服务的所有用户的无差错的等效信道状态信息,并且每个用户也能获得信道状态信息。BC 用户 i 的单播数据流经过发送干扰抑制矢量、信道和接收干扰抑制矢量作用后,接收信噪比为:

$$SNR = \frac{\|H_i f_i\|^2}{\sigma^2 + \sum_i^K \|H_i f_i\|^2 + \sum_i^N \|H_i f_i\|^2} \quad (9)$$

接收端 i 可以获得的单播信号的和速率为:

$$R_i = \log_2 \left(1 + \frac{\|H_i f_i\|^2}{\sigma^2 + \sum_i^K \|H_i f_i\|^2} \right) \quad (10)$$

接收端 i 可以获得的多播信号的和速率为:

$$R_o = \log_2 \left(1 + \frac{\|H_i f_i\|^2}{\sigma^2 + \sum_i^K \|H_i f_i\|^2} \right) \quad (11)$$

由此,系统的总和速率为:

$$R = \sum_{i=1}^N (R_i) + \sum_{i=1}^K (R_o) \quad (12)$$

接着对系统的和速率随系统发送信噪比的变化进行仿真。其中,横坐标 SNR 的单位是 dB,每条直线段的斜率和其对应的系统空间复用增益是 10 倍的关系。

首先选取实验的数据,在主网用户数与次网用户数相等和不等两种情况下,将统计的不同模型的空间复用增益一起展示到图中,从而得到如图 3 所示的仿真结果。

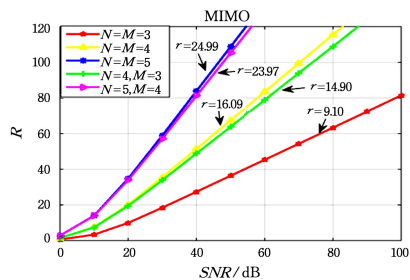


图 3 多用户模型的和速率与信噪比的关系

Fig. 3 Relationship between rate and signal to noise ratio of multi-user models

由图 3 可知,随着用户数的增加,系统的空间复用增益增加。当 N 值固定时,空间复用增益随 M 值的增大而增大。并且当主网和次网的用户数相同时,空间复用增益呈二次指数增长。

4.2 系统的天线效率

由此可以得到一般模型的天线效率为:

$$E = (N^2 - N + M) / (2N^2 - N + 3M) \quad (13)$$

首先进行理论分析。由式(13)可知,天线效率会随主网 BC 的用户数和次网 BC 的用户数的增加而减少。接着在 Matlab 上进行仿真验证,依次选取 N 为 3, 5, 8, 10, 15, 50, 200 等随机值。在代码中依次改变 N 值,并将所得的图形在同一幅图中叠加展示。系统天线效率图如图 4 所示。

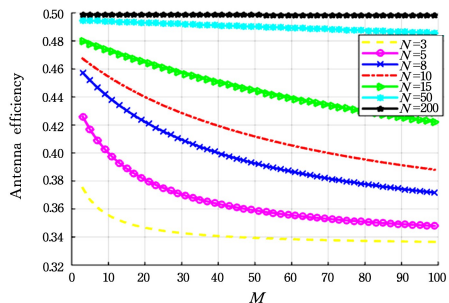


图 4 系统天线效率图

Fig. 4 System antenna efficiency diagram

由图 4 可知,当 M 为固定值时,系统的天线效率会随 N 值的增大而增大,但是当 N 值逐渐增大时,天线效率会无限趋近于 0.5,说明主网用户数的增大对系统天线效率有增益效果,但是系统的限制天线效率最大值只能是 0.5。当 N 固定不变时,天线效率随 M 值的增大而减小,说明次网用户数的增大对系统有削减效果。在设计主网纯多播 BC 信道并存次网 BC 单播信道的模型时,应该适当地增加主网的用户数,减少次网的用户数。为获得较高的天线效率,主网用户数应远大于次网用户数。

结束语 在单广播并存的模型中,使用将若干干扰消息置于零空间的交的迫零方法来消除干扰。通过在发送端合理设计预编码矩阵,使用户能够得到期望消息,提高系统的和速率。由于当前关于 BC 单广播并存的领域涉及的研究较少,该模型也为多用户网络与少用户网络并存的模型的深化研究提供了理论依据。多播 BC 信道和单播 BC 信道并存的单广播模型中,主网在发送多播消息的同时提高了次网抗消息干

Based on Untrusted Environment[J]. Computer Science, 2015, 42(2):108-113. (in Chinese)

刘学军,陈玉凤,李斌. 基于不可信环境的移动位置隐私保护[J]. 计算机科学, 2015, 42(2):108-113.

- [13] HUO Z, MENG X F. A Surey of Trajectory Privacy-Preserving Techniques [J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(10):1820-1830. (in Chinese)

霍峥,孟小峰. 轨迹隐私保护技术研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(10):1820-1830.

- [14] MENG X F, PAN X. Privacy Preservation based on Location Services[J]. Communications of the CCF, 2010, 6(6):16-23. (in Chinese)

孟晓峰,潘晓. 基于位置服务的隐私保护[J]. 中国计算机协会通讯, 2010, 6(6):16-23.

- [15] HUANG X H. Research on Location Privacy Preservation in Location-based Services[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)

黄勋辉. 基于位置服务的位置隐私保护研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016.

- [16] SEN S, WANG J. Analyzing peer-to-peer traffic across large networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(2):219-232.

- [17] REITER M K. Crowds: anonymity for Web transactions[J]. Acm Transactions on Information & System Security, 1998, 1(1):66-92.

- [18] DIAZ C, CLAESSENS J, PRENEEL B. APES: Anonymity and Privacy in Electronic Services[J]. Datenschutz Und Datensicherheit, 2005, 27(3):143-145.

(上接第 123 页)

扰的能力。同时控制次网的用户数对整个系统的天线效率也有增益效果。本文通过分析给出该模型的最佳天线配置,提高了系统的天线效率。下一步工作是将本方案应用到其他并存模型中,使更多的单广播网络并存,以适应当下不同场合的需要。

参 考 文 献

- [1] BIGLIERI E, CALDERBANK R, CONSTANTINIDES A, et al. MIMO wireless communications [J]. Cambridge University Press, 2007, 51(11):2709.

- [2] VISHWANATH S, JINDAL N, GOLDSMITH A. Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of Gaussian MIMO broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10):2658-2668.

- [3] WANG Y, LIU F, ZENG L S, et al. Analysis of KusersBC network with null space intersection and Multicast[J]. Journal of Xidian University (Natural Science Edition), 2018, 45(2):135-140. (in Chinese)

王越,刘锋,曾连荪,等. 结合零空间交与多播的K用户BC网络分析[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2018, 45(2):135-140.

- [4] CHEN J Y, ELIA P. MIMO BC with imperfect and delayed channel state information at the transmitter and receivers [C]// 2013 IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2013:195-199.

- [5] STAVRIDIS A, RENZO M D. Performance Analysis of Multistream Receive Spatial Modulation in the MIMO Broadcast Channel[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(3):1808-1820.

- [6] LEE N, SHIN W, HEATH R W, et al. Interference Alignment with limited feedback for two-cell Interfering MIMO-MAC [C]// International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, 2012:566-570.

- [7] JAFAR S A, FAKHEREDDIN M J. Degrees of freedom for the MIMO interference channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(7):2637-2642.

- [8] CHEN G, XIANG Z, XU C, et al. On Degrees of Freedom of freedom of wireless X networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(9):3893-3908.

- [9] IGHOMI M Z, WANG Z D. Degrees of Freedom Region of Wireless X Networks Based on Real Interference Alignment [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(4):1931-1941.

- [10] PIZZIO R, UCHÔA-FILHO B F, RENZO M D, et al. Generalized spatial modulation for downlink multiuser MIMO systems with multicast [C]// 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). NJ: IEEE Press, 2016:1-6.

- [11] CHOI Y I, KANG C G. MIMO transmission scheme for scalable video broadcast and multicast service [C]// 2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). NJ: IEEE Press, 2016:365-367.

- [12] JO G, LEE J N, BAE H O, et al. LTE based spatial multiplexing MIMO with single radio [C]// 2016 46th European Microwave Conference (EuMC). IEEE, 2016:1319-1322.

- [13] YANG L, QARAQE K, SERPEDIN E, et al. Sum-rate analysis of spectrum sharing spatial multiplexing MIMO systems with zero-forcing and multiuser diversity [C]// 2013 IEEE 14th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). 2013:585-589.

- [14] MOHARRAM M A, KISHK A A. MIMO Antennas Efficiency Measurement Using Wheeler Caps [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 66(3):1115-1120.

- [15] REN H, LIU N, PAN C H, et al. Energy Efficiency Optimization for MIMO Distributed Antenna Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3):2276-2288.

- [16] 张贤达. 矩阵分析与应用(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:601-613.