



专题:4G&5G

大规模 MIMO 系统传输关键技术研究进展

阳析,金石

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

摘要:随着物联网的兴起和移动互联网业务种类的日渐丰富,人们对蜂窝移动通信数据传输速率以及服务质量提出了更高的要求。由于能够充分挖掘空间维的自由度,在提高频谱效率的同时获得较好的功率利用率,大规模 MIMO 系统引起了国内外的广泛关注。大规模 MIMO 系统配置的大规模天线阵列在带来性能增益的同时也带来了前所未有的挑战,如大规模天线阵列系统下传输方案的设计、急剧增加的系统硬件复杂度和计算复杂度等。首先对大规模 MIMO 系统下的几种传输方案,如联合空分复用(JSDM)传输方案和大规模多波束空分多址(MB-SDMA)传输方案进行了概述,简略描述了不同传输方案的原理和传输过程,进一步简要介绍了目前正在构建的大规模 MIMO 原型验证系统 Argos 和 LuMaMi,并展示了不同原型验证系统的整体架构与组件。

关键词:大规模 MIMO 系统;系统传输方案;原型验证系统

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015118

Overview of Key Technologies of Transmission in Massive MIMO System

Yang Xi, Jin Shi

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the rise of the internet of things and rapid development of the mobile internet business, higher data rate of service is demanded. Due to the ability of fully exploiting the spatial degree of freedom and obtaining good energy efficiency while improving spectral efficiency, massive MIMO has attracted wide attention worldwide. Many challenges are also brought by large antenna array at the same time of acquiring performance gain. For example, the design of transmission scheme in massive MIMO system, the dramatic increase in the complexity of hardware and the complexity of computation and so on. Firstly, some transmission strategies such as joint spatial division and multiplexing (JSDM) and massive beam-spatial division multiple access (MB-SDMA) in massive MIMO system, including their principles and transmission process were illustrated, then massive MIMO demo systems Argos and LuMaMi were presented, and the overall structure and component of the different demo systems were also provided.

Key words: massive MIMO system, system transmission scheme, demo system

收稿日期:2015-04-28;修回日期:2015-05-07

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(No.61222102)

Foundation Item: The National Natural Science Fund for Outstanding Youth Fund Project (No.61222102)

论文引用格式:阳析,金石. 大规模 MIMO 系统传输关键技术研究进展. 电信科学, 2015118

Yang X, Jin S. Overview of key technologies of transmission in massive MIMO system. Telecommunications Science, 2015118

1 引言

随着移动互联网业务种类的日渐丰富,智能终端数量的持续爆炸式增长,人们对移动通信数据传输速率以及服务质量的需求不断提高。为适应宽带信息服务向移动终端延展的需要,移动通信系统要求能够支持高达每秒数百兆甚至吉比特的高速分组数据传输,在无线资源日趋紧张的情况下,采用多天线发送和多天线接收(multiple-input multiple-output, MIMO)的无线传输技术,可以充分挖掘利用空间无线资源,提高频谱利用率和功率效率,因而 MIMO 无线传输技术成为 3GPP LTE(3rd Generation Partnership Project long term evolution, 第三代合作伙伴计划长期演进)的关键技术^[1]。此后,为进一步提高频谱效率,改善小区边缘性能,提升系统容量,3GPP 组织在 2011 年 3 月发布的 R10 版本即 LTE-Advanced(以下简称 LTE-A)中引入了载波聚合和更先进的天线技术,系统在基站侧最多可支持 8 个天线端口用于数据的传输^[2]。

然而, LTE 系统的可达频谱效率和小区边缘频谱效率仍然较低,并不能满足迅猛发展的移动互联网和物联网市场与业务应用的需求,由此,对 5G 移动通信系统的研究应运而生。其中,最早由 Marzetta 提出的采用大规模天线阵列的大规模 MIMO 无线传输技术成为 5G 无线通信的研究热点^[3]。大规模 MIMO(又名 massive MIMO, large-scale antenna system, very large MIMO)是利用基站侧配置的大规模天线阵列服务小区中若干用户的 MIMO 系统。参考文献[3~6]的研究表明:当天线数目趋于无穷大时,大规模 MIMO 能够有效提高空间分辨率,削弱快衰落、非相关噪声的影响,使空间资源能够进一步划分,可以采用空分多址(space division multiple access, SDMA)的复用方式,增加同时调度与服务用户个数,实现多用户(multiple user, MU)传输,提高系统容量。

通过在基站侧配置大规模天线阵列,且基站侧天线数远多于同时服务的用户天线数,相比于传统 MIMO 系统,大规模 MIMO 系统可获得以下增益。

- 更高的数据传输速率:一般来说,在传播环境良好的情况下,配置的天线数越多,可同时传输的数据流数越多,可同时服务的用户数也越多,由于基站侧配置了大规模天线阵列,因而可以支持传输更多的数据流和服务更多的用户,获得更高的数据传输速率。

- 更高的可靠性:由于基站侧配置了大规模天线阵列,天线的有效孔径增大,可以接收到更多从周围环境中折射或散射过来的径,从而增加了接收信号的分集度,通信的可靠性得到加强。
- 更高的功率利用率和更少的干扰:大规模天线阵列的使用可以增强系统的空间分辨力,当基站侧探测目标用户的大致位置方位时,可以更具有指向性地发送信号,使得在节省发送信号功率的同时减少对其他用户的干扰。

由上文可知,大规模 MIMO 技术成为下一代无线通信系统最有潜力的无线传输技术之一,在大规模 MIMO 系统下的传输方案也被研究者们先后提出,以期最大地获取由大规模天线阵列所带来的系统性能增益。此外,由于在基站侧引入大规模天线阵列,系统实现的硬件复杂度与计算复杂度急剧上升,如何实现大规模 MIMO 的原型验证系统也是一个非常具有挑战性的问题。

2 大规模 MIMO 系统传输方案

蜂窝移动系统的传输方案决定了系统最终能达到的最优性能。在大规模 MIMO 系统中,由于基站侧配置了大规模天线阵列,信道状态信息(CSI)的获取成为影响大规模 MIMO 系统传输方案性能的核心问题。在频分双工(FDD)系统中,传统传输方案为利用下行链路的导频训练和用户终端反馈来获取发送端信道状态信息(CSIT);在大规模 MIMO 系统中,基站侧下行发送的天线数巨大,若使用正交导频,由于导频长度与发射天线数成正比,下行导频的开销将不可接受,同时,用户侧 CSIT 的反馈量也将是巨大的;在时分双工(TDD)系统中,利用信道的互易性,先进行上行导频训练,而后根据信道互易性,基站获得下行链路的信道信息,导频开销与所有用户的总天线数成正比,当用户数较多、用户端配置多天线时,导频开销依然很大。因而传统的传输方案并不适用于大规模 MIMO 系统。为此,研究者们先后提出了在大规模 MIMO 系统下的联合空分复用(joint spatial division and multiplexing, JSDM)传输方案^[7]和大规模多波束空分多址(massive beam-spatial division multiple access, MB-SDMA)传输方案^[8],分别利用信道二阶统计信息对用户进行分组并将信号转换到波束域中进行空分多址方式的传输,在匹配大规模 MIMO 系统信道特性的同时,解决由大规模天线阵列引入的导频瓶颈问题。本节将分别对 JSDM 传输方案和 MB-SDMA 传输方案



进行简单介绍。

2.1 JSMD 传输方案

简单来说,JSMD 传输方案就是利用在相邻或相近位置的用户往往具有相同(或相似)信道相关阵的事实,依据各用户信道相关阵的相似性,采用固定量化或传统聚类的方法对用户进行合理的分组,使得在同一分组中的用户终端具有相似的信道相关阵即地理位置邻近,而不同分组中的用户在 AOA(angle of arrival,到达角)维度上充分间隔开,然后在组内采用适当的用户调度算法有效地挑选出调度的用户集合进行数据传输,在充分挖掘空间维度的同时降低每组用户有效信道的维数^[7-10]。

JSMD 传输方案如图 1 所示。

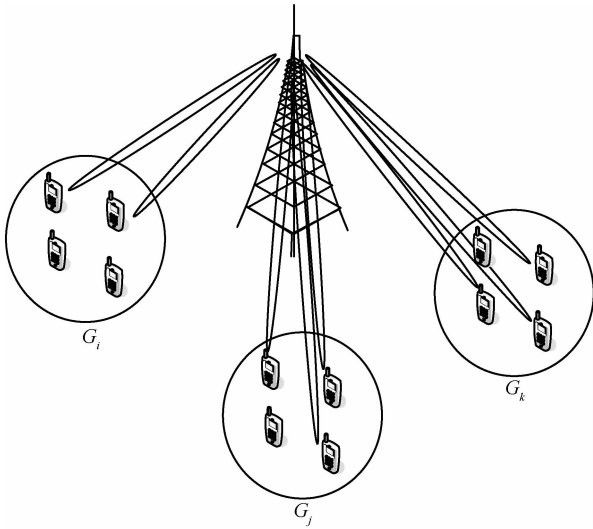


图 1 JSMD 传输方案示意

JSMD 传输方案根据是否需要对整个系统的有效信道进行估计与整体反馈,又可分为联合小组处理(joint group processing, JPG)方案和独立分组处理(per-group processing, PGP)方案。由于 JPG 方案所需的反馈量与计算复杂度较大,因此本文更多地关注 PGP 方案。JSMD 传输方案包含两个阶段的预编码,表示为:

$$V=BP \quad (1)$$

其中, $B \in \mathbb{C}^{Mb \times M}$ 是预波束成形矩阵,用于匹配信道相关阵中获取的方向信息,仅依赖于信道的二阶统计量, $P \in \mathbb{C}^{b \times S}$ 是多用户 MIMO 预编码矩阵,取决于经过预波束成形矩阵 B 后的等效信道矩阵, M 为基站侧天线数, S 为传输的数据流数, b 为可优化参数,且满足 $b > S$ 。假设小区基站侧配置 M 根天线,小区中共有 K 个单天线用户,其下行传输信道模型为:

$$y = \begin{bmatrix} h_1^H \\ \vdots \\ h_K^H \end{bmatrix} x + z \quad (2)$$

其中, $x \in \mathbb{C}^M$ 是基站侧发送信号, $y \in \mathbb{C}^K$ 是 K 个用户接收到的信号, $z \sim \mathcal{CN}(0, I_K)$ 为高斯白噪声, $h_k \in \mathbb{C}^M$ 为第 k 个用户的上行信道向量。设第 g_k 个用户的信道向量为 h_{g_k} , $H_g = [h_{g_1} \cdots h_{g_{k_g}}]$ 为第 g 个小组的信道矩阵, B_g 表示第 g 个小组的 $M \times b_g$ 维预波束成形矩阵, $H = [H_1 \cdots H_G]$ 为整个系统的信道矩阵, $\underline{H} \triangleq B^H H$ 为经过预波束成形矩阵 B 后的等效信道矩阵,因而经过两级预编码后的下行传输信道模型可写为:

$$y = \underline{H}^H P x + z \quad (3)$$

其中:

$$\underline{H}^H = \begin{bmatrix} H_1^H B_1 & H_1^H B_2 & \cdots & H_1^H B_G \\ H_2^H B_1 & H_2^H B_2 & \cdots & H_2^H B_G \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_G^H B_1 & H_G^H B_2 & \cdots & H_G^H B_G \end{bmatrix} \quad (4)$$

在 PGP 方案中,多用户 MIMO 预编码矩阵采用块对角矩阵,即 $P = \text{diag}(P_1, \cdots, P_G)$, 其中 $P_g \in \mathbb{C}^{b_g \times S_g}$, 所以式(3)可简化为:

$$y_g = H_g^H P_g s_g + \sum_{g' \neq g} H_g^H B_{g'} P_{g'} s_{g'} + z_g \quad (5)$$

进一步对分组和预波束成形矩阵进行设计,采取特征根波束成形和块对角化的方法,使得对所有的 $g' \neq g$, 有式(6)成立:

$$H_g^H B_{g'} \approx 0 \quad (6)$$

式(6)即精确对角化,则 $y_g \approx H_g^H P_g s_g$, 从而不同用户组之间的干扰可被消除,同时等效信道的维数也被降低。此时在第 g 个小组中, P_g 可采用等效信道的正则迫零(regularized zero-forcing, RZF)预编码矩阵。其传输流程大致如下。

(1) 确定相似性度量准则:根据信道的二阶统计量定义用户与小组之间的相似性度量值。

(2) 用户分组:依据定义的度量准则对不同的用户进行分组,使得每个组内的用户具有相同的特征子空间(称为小组特征空间),而不同小组的特征空间不重叠或正交。

(3) 组内调度:在组内进行用户调度,调度出的可同时进行传输的用户在组内进行小规模 CSI 反馈,基站侧根据已知的信道信息利用特征根波束成形和块对角化的方法获得预波束成形矩阵 B_g ,进而得到多用户 MIMO 预编码矩阵 P_g 。

(4)开始上下行数据传输。

JSDM 传输方案的主要思想为:在大规模 MIMO 场景下,利用信道的二阶统计信息对用户进行分组,从而最大限度地挖掘空间维度,以尽可能地获取大规模天线阵列所带来的增益,但由于需要对小区内所有用户利用相似度量准则进行用户分组和计算预波束成形矩阵以及多用户 MIMO 预编码矩阵,JSDM 方案的计算复杂度较高,如何在损失较多性能增益的情况下尽可能地降低计算复杂度是一个值得研究的课题。

2.2 MB-SDMA 传输方案

MB-SDMA 传输方案的核心思想是:通过将信号转换到波束域,利用用户波束域信道的稀疏性,采取相应的用户调度方法,使占用不同波束集合的用户与基站同时进行通信,每个波束集合只接收/发送单个用户的信号,从而化繁为简,将多用户 MIMO 传输链路分解为若干个单用户 MIMO 信道链路,在降低计算复杂度的同时也减少了用户间的干扰。MB-SDMA 传输方案如图 2 所示,基站依据获取到的波束域信道统计信息,利用相应的用户调度算法调度出 3 个用户,为每个用户分配不同的波束集合使得多个用户可在同一时频资源上进行数据的传输。

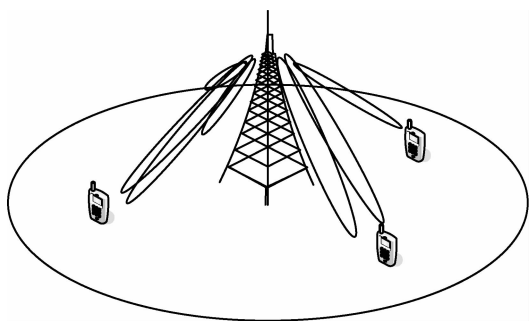


图 2 MB-SDMA 传输方案示意

在大规模 MIMO 系统中,下行传输波束域信道定义为:

$$\tilde{H}_{k,l}^d = H_{k,l}^d F \quad (7)$$

其中, $H_{k,l}^d$ 为第 k 个用户在第 l 个子载波上的下行传输信道, F 为 DFT (discrete fourier transform, 离散傅里叶变换) 矩阵, $\tilde{H}_{k,l}^d$ 为第 k 个用户在第 l 个子载波上的下行传输波束域信道。波束域信道矩阵的不同列, 对应不同的发射角度 (angle of departure, AOD), 每一个方向称为一个波束。整个传输过程可以分为以下几个阶段。

(1) 获得统计信道信息: 各个用户分别发送各自的上行探测信号, 基站通过接收到的探测信号估计出各个用户

波束域统计信道信息。

(2) 用户调度: 采用相应的用户调度准则对各个用户和各个波束进行调度, 在使不同用户使用不同波束集合的原则上, 可根据不同的系统目标采取最大和速率准则或比例公平准则。

(3) 分解为单用户 MIMO 链路: 通过用户调度, 不同用户与基站不同的波束集合进行通信, 从而实现将多用户 MIMO 链路分解为多个单用户 MIMO 链路为:

$$y_{k,l}^d = \sqrt{\rho_{k,l}^d} [H_{k,l}^d]^{B_k} s_{k,l}^d + \sum_{j=1, j \neq k}^K \sqrt{\rho_{j,l}^d} [H_{j,l}^d]^{B_j} s_{j,l}^d + n_{k,l} \quad (8)$$

其中, $s_{k,l}^d$ 为第 k 个用户在第 l 个子载波上的波束域发射信号, $\rho_{k,l}^d$ 为其发射功率, $n_{k,l}$ 为高斯白噪声, B_k 为第 k 个波束集合。

(4) 上下行链路传输: 在上行链路中, 基站估计瞬时信道信息以及干扰的相关阵, 对接收信号进行相干检测; 在下行链路中, 用户估计瞬时信道信息以及干扰的相关阵, 对接收信号进行相干检测。

3 大规模 MIMO 系统原型验证平台

在大规模 MIMO 系统中, 由于在基站侧引入大规模天线阵列, 系统实现的硬件复杂度与计算复杂度随着天线数的增加急剧上升, 如何实现大规模 MIMO 的原型验证系统是一个非常具有挑战性的问题。目前所知正在构建的大规模 MIMO 的原型验证平台主要有美国莱斯大学 (Rice University) 和 Bell 实验室合作搭建的 Argos^[11,12] 以及瑞典隆德大学 (Lund University) 和美国国家仪器公司 (National Instruments, NI) 合作实现的 LuMaMi^[13]。

3.1 Argos

Argos 是一款用于大规模天线多用户波束成形的原型验证系统, 可同时服务多个用户, 它采取了层次化和模块化的设计, 使得系统更具有可扩展性。2012 年 Argos V1 实现了在基站侧配置 64 根天线, 在室内的环境下, 可同时服务 15 个单天线用户。2013 年, Argos V2 在 Argos V1 的基础上将基站侧天线扩展到 96 根, 可同时支持 32 个数据流的传输。

构成 Argos 系统的主要组件有: WARP (wireless open access research platform, 无线开放接入研究平台) 模块、时钟分发板、中央控制器、以太网交换机, 其逻辑结构^[14]如图 3 所示。每个 WARP 模块由一块母板和一块子板组成, 包含

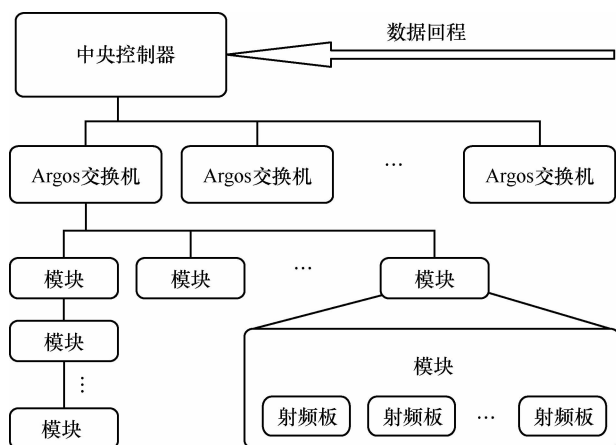


图3 Argos平台逻辑结构

4个射频端口与1块FPGA(field-programmable gate array,现场可编程门阵列),主要将数字信号转换为射频信号或者将射频信号转换为数字信号;时钟分发板的功能为实现各个组件之间的时钟同步;中央控制器负责对基带的数据进行处理和分析;以太网交换机负责汇聚从各个射频前端采集到的信号并转发给中央控制器进行基带处理。

Argos的设计特点为:采用了层次式和模块化的设计,使得系统具有良好的可扩展性,例如若想增加基站侧发送天线数,只需在Argos交换机处增加WARP模块即可实现系统硬件的扩展;Argos将整体的计算任务在多个模块间进行层次化分配,在下行传输中,利用改进的波束成形算法将数据的波束成形加权计算在各个天线所属的模块本地进行,将计算量均分到各个模块从而减轻中央处理器的计算复杂度;为校正通道的一致性,Argos提出了一种通道校准算法,通过采用内部校正过程使CSI估计开销与天线数目无关。

Argos V2实物如图4所示。每个机柜放置12个WARP

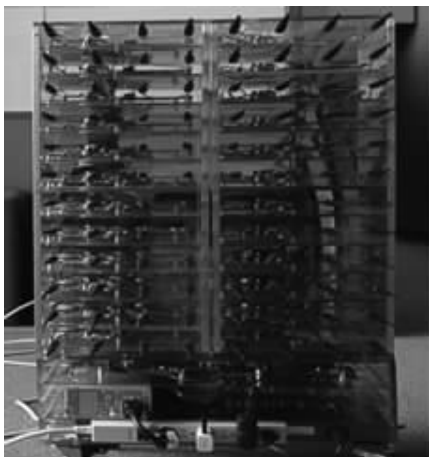


图4 Argos V2实物

模块,两个机柜共放置24个WARP模块、96根天线^[2]。

3.2 LuMaMi

LuMaMi是由瑞典隆德大学的Ove Edfors教授和Fredrik Tufvesson教授与美国国家仪器公司合作,使用美国国家仪器公司的大规模MIMO应用程序框架和硬件平台开发出的大规模MIMO系统。该系统主要由SDR(software defined radio,软件定义无线电)节点(USRP-RIO系列)、时钟分发板、中央控制器和PXI Express机箱组成,其结构如图5所示。

整个系统的框架由PXIe-1085机箱搭建而成,采用层次化设计,数据由USRP-RIO采集后经PXIe-8262接口汇聚到各个子PXIe-1085机箱,每个子PXIe-1085机箱最多可连接16个USRP-RIO即构成32×32的MIMO,各个子PXIe-1085机箱再通过PXIe-8384和PXIe-8381汇聚到主PXIe-1085机箱,主PXIe-1085机箱上除配置PXIe-8135高性能嵌入式控制器外,还搭载了PXIe-7976的FPGA协处理器以用于提高数据的处理能力。此外,系统时钟模块采用的是PXIe-6674T,可实现系统的定时和多机箱同步。在此硬件架构的基础上,由瑞典隆德大学和美国国家仪器公司合作构建的LuMaMi系统逻辑架构^[13]如图6所示。

LuMaMi采用OFDM无线传输技术,系统带宽为20 MHz,基站侧最多可配置128根天线,可支持10个用户同时传输。由于基站侧配置天线数较多,系统带宽较宽,假设采样速率为30.72 MHz,ADC(analog to digital converter,模数转换)的转换精度为16 bit,一个射频通道的数据吞吐量将为122.88 Mbit/s(包含I、Q两路数据),128根天线的数据吞吐量为15.36 Gbit/s,若将数据集中传输到基带进行处理,不仅系统的数据传输压力较大,基带的数据处理能力也会面临严峻的挑战,因而LuMaMi考虑将整个系统划分为8个子带系统,每个子带系统负责处理1.5 MHz带宽的数据。每个子带系统又由8个模块组成,分别是天线合并(antenna combiner)模块、带宽拆分(bandwidth splitter)模块、信道估计(channel estimation)模块、MIMO检测(MIMO detector)模块、接收校正(rec calibration)模块、MIMO预编码(MIMO precoder)模块、带宽合并(bandwidth combiner)模块和天线拆分(antenna splitter)模块。其中,天线合并模块和天线拆分模块分别负责汇聚来自各个天线的数据并将数据分发至各个物理天线,带宽拆分模块负责将该子系统中整带宽的数据划分成不同子带并分配至其他子系统,带宽合并模块负责汇聚其他子系统传输过来的子带的数据,MIMO检测模块和MIMO预编码模块则分

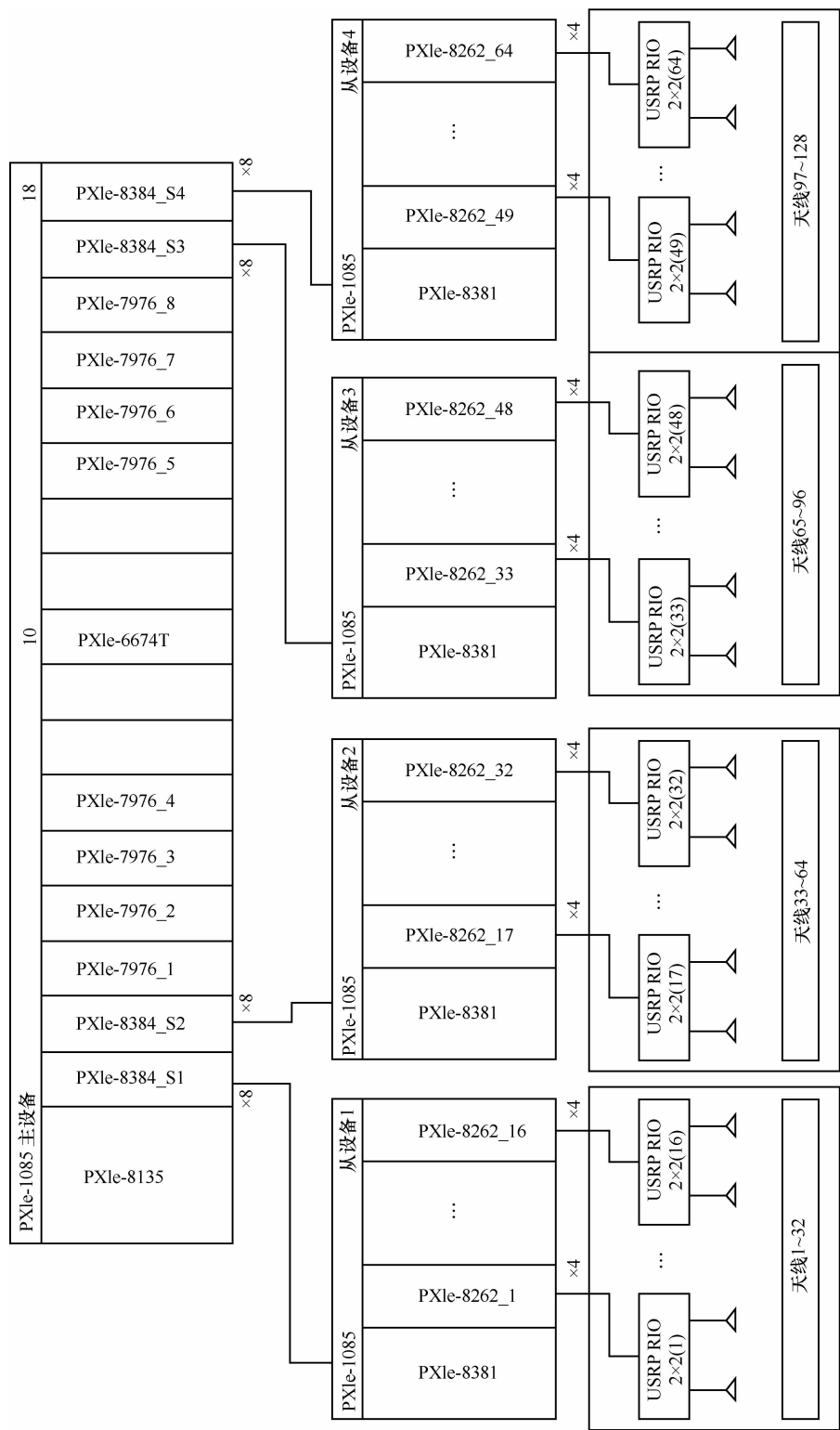


图 5 NI 基于 PXI 和 USRP RIO 的可扩展大规模 MIMO 系统

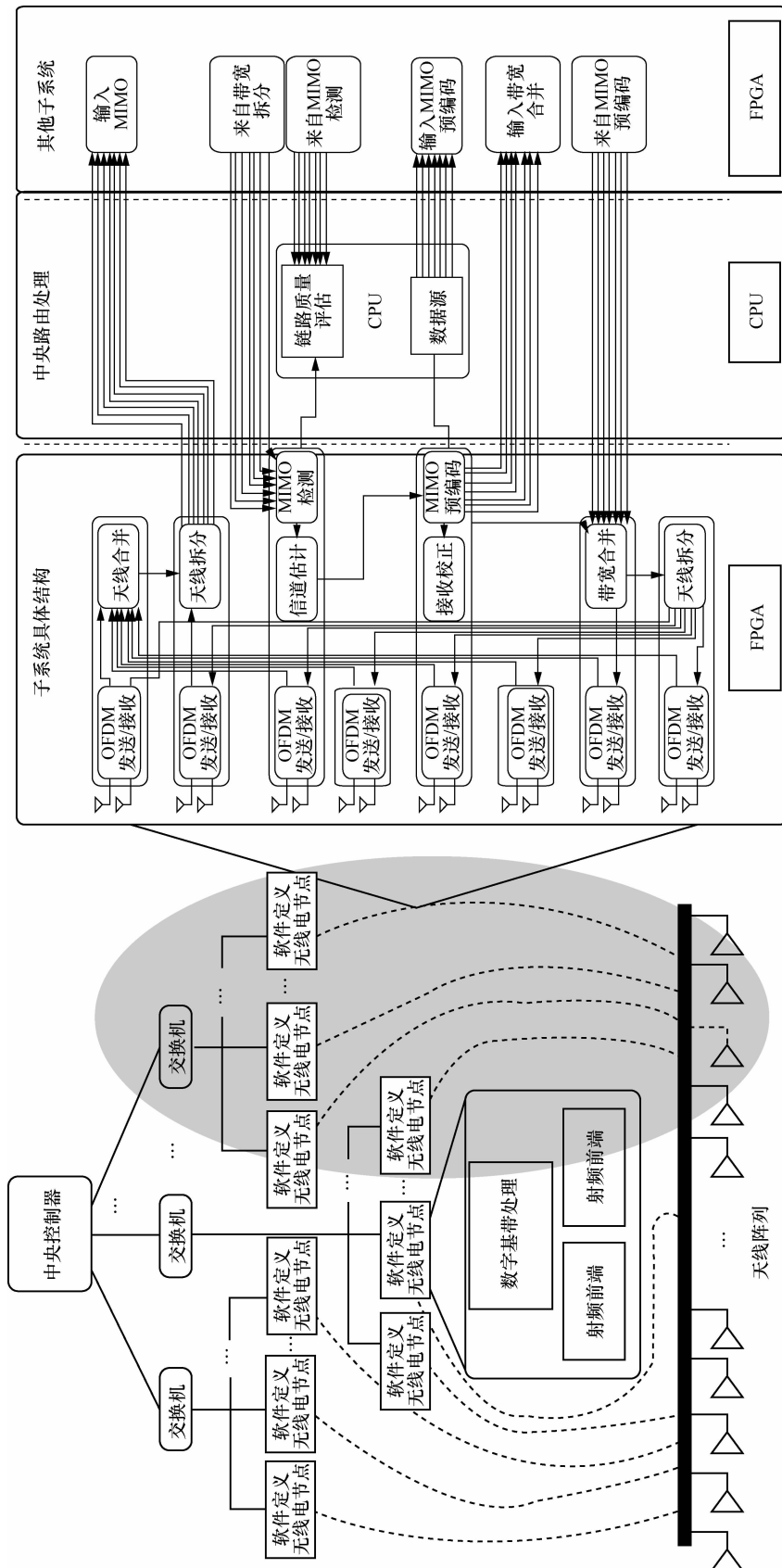


图 6 LuMaMi 的系统逻辑架构

别负责对该子系统所负责的子带数据进行检测译码和预编码。

相比于 Argos, 由于 LuMaMi 有美国国家仪器公司的产品支持, 开发更具备可复制性。首先, 在硬件上, 采用成熟的软件无线电节点即 USRP-RIO 系列和 PXIe 机箱的 LuMaMi, 在硬件设备的连接与稳定性方面更为可靠; 其次, 在软件上, 大规模 MIMO 应用程序框架的开发也可在美国国家仪器公司提供的统一的软件平台——NI LabVIEW 上进行, 从而有利于对整个原型验证平台的设计布局和调试进行控制。值得一提的是, 在大规模 MIMO 系统中, 当天线数量较多时, 若将数据进行集中处理会给系统的数据传输和数据处理带来较大压力, 因而 Argos 中提出的将波束成形加权计算在各个天线所属的模块本地进行以及通过采用内部校正过程校准通道使 CSI 估计开销与天线数目无关等处理方法, 对于系统的实现很有借鉴意义。

4 结束语

大规模 MIMO 技术是下一代无线通信系统最有潜力的无线传输技术之一。本文主要介绍了大规模 MIMO 系统下两种传输方案, 即 JSMD 传输方案和 MB-SDMA 传输方案, 简要叙述了方案的原理和传输过程; 此外, 还对当前几种大规模 MIMO 的原型验证系统 Argos 和 LuMaMi 进行了简单介绍。大规模 MIMO 无线通信技术已成为国内外的研究热点, 但相关研究工作尚处在起步阶段, 还有大量课题需要进行研究, 如大规模 MIMO 系统中的导频污染、射频通道的一致性校准、FDD 下的大规模 MIMO 系统方案等。

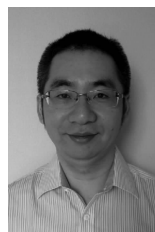
参考文献

- 3rd Generation Partnership Project. TR 25.913-900. Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN), 2009
- 3rd Generation Partnership Project. TR 36.912-900. Feasibility Study for Further aAdvancements for E-UTRA (LTE-Advanced), 2011
- Marzetta L T. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3590~3600
- Rusek F, Persson D, Lau B K, *et al.* Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays. Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40~60
- Lu L, Li G Y, Swindlehurst L A, *et al.* An overview of massive MIMO: benefits and challenges. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 742~758
- Larsson G E, Edfors O, Tufvesson F, *et al.* Massive MIMO for next generation wireless systems. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 186~195
- Adhikary A, Nam J, Ahn J, *et al.* Joint spatial division and multiplexing-the large-scale array regime. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(10): 6441~6463
- Sun C, Gao X Q, Jin S, *et al.* Beam division multiple access transmission for massive MIMO. IEEE Transactions on Communications, revised
- Nam J, Ahn J, Adhikary A, *et al.* Joint spatial division and multiplexing: realizing massive MIMO gains with limited channel state information. Proceedings of Information Sciences and Systems(CISS), Princeton, New Jersey, USA, 2012: 1~6
- Nam J, Adhikary A, Ahn J, *et al.* Joint spatial division and multiplexing: opportunistic beamforming, user grouping and simplified downlink scheduling. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 876~890
- Shepard C, Yu H, Anand N, *et al.* Argos: practical many-antenna base stations. Proceedings of Annual International Conference on Mobile Computing & Networking, Istanbul, Turkey, 2012, 11(1): 53~64
- Shepard C, Yu H, Zhong L. ArgosV2: a flexible many-antenna research platform. Proceedings of Annual International Conference on Mobile Computing & Networking, Miami, USA, 2013: 163~166
- Vieira J, Malkowsky S, Nieman K, *et al.* A flexible 100-antenna testbed for massive MIMO. Proceedings of IEEE Globecom 2014 Workshop - Massive MIMO: from Theory to Practice, Texas, USA, 2014

[作者简介]



阳析, 女, 东南大学硕士生, 主要研究方向为链路自适应、大规模 MIMO 无线通信系统。



金石, 男, 东南大学移动通信国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向包括 5G 移动通信理论与关键技术、多天线技术、协作通信及现代信号处理技术在移动通信中的应用等。