



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 03809167.4

[43] 公开日 2005 年 8 月 10 日

[11] 公开号 CN 1653721A

[22] 申请日 2003.2.19 [21] 申请号 03809167.4

[30] 优先权

[32] 2002. 2. 26 [33] US [31] 10/085,456

[86] 国际申请 PCT/US2003/005365 2003. 2. 19

[87] 国际公布 WO2003/073646 英 2003. 9. 4

[85] 进入国家阶段日期 2004. 10. 22

[71] 申请人 高通股份有限公司

地址 美国加利福尼亚州

[72] 发明人 I·梅德弗德夫 J·R·沃尔顿

M·华莱士

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司

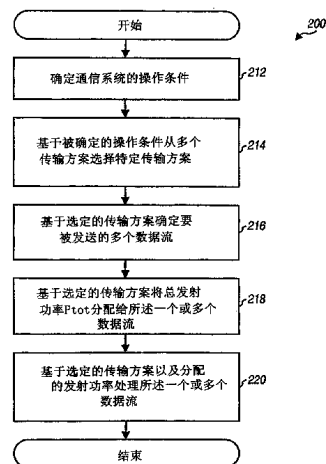
代理人 李家麟

权利要求书 8 页 说明书 23 页 附图 3 页

[54] 发明名称 多个传输模式的多输入、多输出 (MIMO) 系统

[57] 摘要

在使用需要更少信道状态信息 (CSI) 的多个传输方案的多信道通信系统内的多个传输信道上发送数据的技术。 这些方案包括部分 CSI 传输方案, 它在每个选用的发射天线上发送单个数据流, “波束成形” 传输方案, 它将所有发射功率分配给带有最佳性能的单个传输信道。 每个传输方案还为特定操作条件 (即工作 SNR) 范围提供较好或接近最优的性能。 这些多个传输方案可以以每部分方式经组合以形成覆盖 MIMO 系统支持的操作条件全范围内的 “多模式” 传输方案。 用于任何时刻的数据传输的特定传输方案取决于系统在该时刻经历的操作条件。



1. 一种在无线通信系统内在多个传输信道上发送数据的方法，其特征在于包括：

确定通信系统的操作条件；

基于确定的操作条件标识从多个可能的传输方案中选择的特定传输方案；

基于选定的传输方案确定要发送的一个或多个数据流；以及

基于选定的传输方案处理一个或多个数据流。

2. 如权利要求1所述的方法，其特征在于所述特定传输方案是通过评估多个可能传输方案的每个而选择的。

3. 如权利要求1所述的方法，其特征在于所述特定传输方案是基于工作信号对噪声和干扰比(SNR)经选择的。

4. 如权利要求1所述的方法，其特征在于所述一个或多个数据流进一步基于信道状态信息经处理。

5. 如权利要求4所述的方法，其特征在于多个传输方案包括部分信道状态信息(CSI)传输方案。

6. 如权利要求5所述的方法，其特征在于部分CSI传输方案的信道状态信息包括信号对噪声和干扰比(SNR)。

7. 如权利要求4所述的方法，其特征在于多个传输方案包括波束形成传输方案。

8. 如权利要求7所述的方法，其特征在于单个传输信道为波束形成传输方案选用，且其中波束成形用于在单个选定传输信道上的数据传输。

9. 如权利要求7所述的方法，其特征在于所述波束形成传输方案的信道状态

信息包括信号对噪声和干扰比(SNR)以及单个选定传输信道的奇异向量。

10. 如权利要求 9 所述的方法,其特征在于奇异向量的每个元素被量化为每维五个比特或更少。

11. 如权利要求 4 所述的方法,其特征在于多个传输方案包括波束成形传输方案。

12. 如权利要求 11 所述的方法,其特征在于波束成形传输方案的信道状态信息包括信号对噪声和干扰比(SNR)以及用于多个用于数据传输的发射天线的相位值向量。

13. 如权利要求 12 所述的方法,其特征在于所述相位值向量基于主本征模式的奇异向量。

14. 如权利要求 1 所述的方法,其特征在于所述操作条件由信号对噪声和干扰比(SNR)量化,其中如果通信系统的工作 SNR 在阈值 SNR 以上,则选用部分 CSI 传输方案,如果工作 SNR 在阈值 SNR 以下,则选用波束成形传输方案。

15. 如权利要求 1 所述的方法,其特征在于还包括:
基于数据流的可获得的信号对噪声和干扰比(SNR)为每个数据流选择一速率。

16. 如权利要求 1 所述的方法,其特征在于所述无线通信系统是多输入多输出(MIMO)通信系统,且多个传输信道对应 MIMO 通信系统的多个空间子信道。

17. 如权利要求 1 所述的方法,其特征在于所述无线通信系统是宽带多输入多输出(MIMO)通信系统,且多个传输信道对应多个频带的多个空间子信道。

18. 如权利要求 17 所述的方法,其特征在于为所有频带选择一个传输方案,且其中一个或多个数据流在每个频带上被发送,且基于选定的传输方案被处理。

19. 如权利要求 17 所述的方法，其特征在于为每个频带选用一个传输方案，且其中一个或多个数据流在每个频带上被发送，且基于为该频带选择的传输方案被处理。

20. 如权利要求 17 所述的方法，其特征在于为多个频带的每个选用波束成形传输方案。

21. 如权利要求 20 所述的方法，其特征在于分配总发射功率使得为在多个频带上发送的所有数据流使用公共的编码和调制方案。

22. 如权利要求 17 所述的方法，其特征在于为多个频带的每个选用部分 CSI 传输方案。

23. 如权利要求 22 所述的方法，其特征在于分配总发射功率使得对在每个频带上发送的所有数据流使用公共编码和调制方案。

24. 如权利要求 22 所述的方法，其特征在于分配总发射功率，使得为在每个空间子信道上发送的所有数据流使用公共编码和调制方案。

25. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于无线通信系统是正交频分多路复用 (OFDM) 通信系统，且多个传输信道对应多个频率子信道。

26. 在多输入多输出 (MIMO) 通信系统内的多个空间子信道上发送数据的方法，其特征在于包括：

确定 MIMO 系统的工作信号对噪声和干扰比 (SNR)；

基于工作 SNR 标识从多个可能传输方案中选择的特定传输方案，其中多个传输方案的每个用于相应的工作 SNR 范围；

基于选择的传输方案确定要发送的一个或多个数据流；以及

基于选定的传输方案处理一个或多个数据流。

27. 如权利要求 26 所述的方法，其特征在于多个传输方案包括部分 CSI 传输

方案和波束成形传输方案，且其中如果工作 SNR 在阈值 SNR 以上，则选用部分 CSI 传输方案，如果工作 SNR 在阈值 SNR 以下，则选用波束成形传输方案。

28. 一方法用于在多输入多输出(MIMO)通信系统内发送数据，其特征在于包括：

基于多个传输信道达到的性能标识多个传输信道的特定一个；

确定对应选定传输信道的相位值向量，对于多个用于数据传输的发射天线的每一个一个相位值；

基于特定的编码和调制方案处理数据；以及

以特定发射功率从多个发射天线的每个发送处理后数据，且其相位是由与发射天线相关联的相位值确定的。

29. 如权利要求 28 所述的方法，其特征在于为每个发射天线使用全发射功率。

30. 一耦合到数字信号处理设备(DSPD)的存储器，所述设备能解释数字信息以执行：

确定通信系统的操作条件；

基于确定的操作条件标识从多个可能的传输方案中选择的特定传输方案；

基于选定的传输方案确定要发送的一个或多个数据流；以及

基于选定的传输方案处理一个或多个数据流。

31. 一计算机程序产品用于方便在无线通信系统内多个传输信道上的数据传输，其特征在于包括：

确定通信系统的操作条件的代码；

基于确定的操作条件标识从多个可能的传输方案中选择的特定传输方案的代码；

基于选定的传输方案确定要发送的一个或多个数据流的代码；以及

基于选定的传输方案处理一个或多个数据流的代码；以及

用于存储这些代码的计算机可用媒质。

32. 无线通信系统内的装置，其特征在于包括：

确定通信系统的操作条件的装置；

基于确定的操作条件标识从多个可能的传输方案中选择的特定传输方案的装置；

基于选定的传输方案确定要发送的一个或多个数据流的装置；以及

基于选定的传输方案处理一个或多个数据流的装置。

33. 如权利要求 32 所述的装置，其特征在于所述无线通信系统是多输入多输出(MIMO)通信系统，且多个传输信道对应 MIMO 通信系统的多个空间子信道。

34. 如权利要求 32 所述的装置，其特征在于所述特定传输方案基于通信系统的操作信号对噪声和干扰比(SNR)选择，且其中多个传输方案的每个用于相应的工作 SNR 范围。

35. 如权利要求 34 所述的装置，其特征在于所述多个传输方案包括部分 CSI 传输方案和波束成形传输方案，且其中如果通信系统的工作 SNR 在阈值 SNR 以上，则选用部分 CSI 传输方案，如果工作 SNR 在阈值 SNR 以下，则选用波束成形传输方案。

36. 如权利要求 32 所述的装置，其特征在于还包括：

基于数据流可获得的信号对噪声和干扰比(SNR)为每个数据流选择一速率。

37. 多输入多输出(MIMO)通信系统内的装置，其特征在于包括：

确定 MIMO 系统的操作信号对噪声和干扰比(SNR)的装置；

基于工作 SNR 从多个可能的传输方案中标识选择的特定传输方案的装置，其中多个传输方案的每个用于相应的工作 SNR 范围；

基于选定的传输方案确定要发送的一个或多个数据流的装置；以及

基于选定的传输方案处理一个或多个数据流的装置。

38. 无线通信系统内的控制器，其特征在于包括：

接收通信系统操作条件的装置；

基于确定的操作条件标识从多个可能的传输方案中标识选择的特定传输方案

的装置；

基于选定的传输方案确定要发送的一个或多个数据流的装置；以及
基于选定的传输方案引导处理一个或多个数据流的装置。

39. 如权利要求 38 所述的控制器，其特征在于还包括：

基于数据流可达到的信号对噪声和干扰比 (SNR) 为每个数据流选择速率的装置。

40. 一基站包括权利要求 38 所述的控制器。

41. 无线通信系统内的发射机单元，其特征在于包括：

控制器，用于引导在多个传输信道上的数据传输，所述引导是通过：
接收通信系统的操作条件的指示；

基于确定的操作条件标识从多个可能的传输方案中选择的特定传输方案；

基于选定的传输方案确定要发送的一个或多个数据流；

部分基于分配给数据流的发射功率量为每个数据流选择一速率；以及

基于选定的传输方案引导一个或多个数据流的处理；

发射 (TX) 数据处理器，用于基于选定的速率处理每个数据流以提供相应的码元流；以及

一个或多个发射机，用于处理一个或多个码元流以提供适于在通信信道上传输的一个或多个已调信号。

42. 如权利要求 41 所述的发射机单元，其特征在于多个传输方案包括部分 CSI 传输方案以及波束成形传输方案。

43. 如权利要求 42 所述的发射机单元，其特征在于所述控制器用于如果通信系统的操作信号对噪声和干扰比 (SNR) 高于阈值 SNR 则选择部分 CSI 传输方案，如果工作 SNR 低于阈值 SNR，则选择波束成形传输方案。

44. 如权利要求 42 所述的发射机单元，其特征在于所述控制器还用于为部分 CSI 传输方案利用每个数据流的峰值发射功率，并对于波束成形传输方案将所有发

射功率分配给单个数据流。

45. 如权利要求 42 所述的发射机单元，其特征在于还包括：

TX MIMO 处理器，用于基于波束成形传输方案的奇异向量对单个数据流的码元流预调整。

46. 一基站包括如权利要求 41 所述的发射机单元。

47. 无线通信系统内的接收机单元，其特征在于包括：

接收(RX)MIMO 处理器，用于根据特定接收机处理方案接收并处理多个接收到码元流以提供至少一个恢复后码元流，并为每个恢复的码元流导出信道状态信息(CSI)。

RX 数据处理器，用于根据至少一个解调和解码方案处理至少一个恢复后的码元以提供解码后数据；以及

TX 数据处理器，用于处理 CSI 以发送回发射机单元；以及

其中基于 CSI 从多个可能传输方案中选择一特定传输方案，其中基于选定的传输方案将一个或多个数据流发送到接收机单元，且其中总可用发射功率基于选定的传输方案被分配给一个或多个数据流。

48. 如权利要求 47 所述的接收机单元，其特征在于多个传输方案包括部分 CSI 传输方案和波束成形传输方案，其中如果工作信号对噪声和干扰比(SNR)在阈值 SNR 以上，则选择部分 CSI 传输方案，如果工作 SNR 在阈值 SNR 以下，则选择波束成形传输方案。

49. 如权利要求 48 所述的接收机单元，其特征在于对于波束成形传输方案，RX MIMO 处理器还用于用奇异向量预调整多个接收到的码元流以提供单个恢复的码元流。

50. 如权利要求 48 所述的接收机单元，其特征在于对于部分 CSI 传输方案，RX MIMO 处理器还用于基于带有连续抵消的最小均方误差接收机处理技术处理多个接收到的码元流以提供多个恢复的码元流。

51. 无线通信系统内的接收机装置，其特征在于包括：

根据特定接收机处理方案处理多个接收到的码元流的装置，以提供至少一个恢复的码元流，并为每个恢复的码元流导出信道状态信息(CSI)；

根据至少一个解调和解码方案处理至少一个恢复的码元流以提供解码后数据的装置；以及

处理CSI以发送回发射机装置的装置；以及

其中基于CSI从多个可能的传输方案中选择特定传输方案，其中，基于选定的传输方案一个或多个传输数据流被发送到接收机装置，且其中基于选定的传输方案将总可用发射功率分配给一个或多个数据流。

多个传输模式的多输入、多输出(MIMO)系统

背景

领域

本发明一般涉及数据通信，尤其涉及带有多种传输模式的多信道通信系统(例如多输入、多输出(MIMO)系统)。

背景

在无线通信系统中，来自发射机单元的 RF 已调信号可以通过多个传播路径到达接收机单元。传播路径的特征一般由于诸如衰落和多径的多个因子而随时间改变。为了提供抗有害路径影响的分集并改善性能，可以使用多个发射和接收天线。如果发射和接收天线间的传播路径是线性独立的(即在一个路径上的传输不是由其它路径上的传输的线性组合形成的)，这在一定程度上为真，则正确地接收到数据传输的可能性随着天线数目的增加而增加。一般，发射和接收天线增加导致分集增加和性能改善。

多输入多输出(MIMO)通信系统使用多个(N_T)发射天线和多个(N_R)接收天线进行数据传输。由 N_T 个发射天线和 N_R 个接收天线形成的 MIMO 信道可能被分解为 N_S 个独立信道，其中 $N_S \leq \min\{N_T, N_R\}$ 。 N_S 个独立信道的每个还被称为 MIMO 信道的空间子信道，并对应一维。如果使用由多个发射和接收天线建立的附加维数，则 MIMO 系统能提供改善的性能(例如增加的传输容量)。例如，可以在 N_S 个空间子信道的每个上发送独立数据流以增加系统频谱效率。

MIMO 系统的空间子信道可以经历不同信道条件(例如不同的衰减和多径效应)且可能对于给定发射功率量获得不同信号对噪声和干扰比(SNR)。因此，空间子信道可以支持的数据速率可以每个子信道不同，这取决于分配给数据流和其获得 SNR 的发射功率量。由于信道条件一般随时间改变，则空间子信道的传输容量也随着时间改变。

编码的通信系统内的关键挑战是有效利用总发射功率 P_{tot} ，该总功率是基于信道条件在 N_S 个空间子信道上在发射机处可用于数据传输的功率。各种方案可以用于在空间子信道上发送数据。每个传输方案可以要求关于 MIMO 信道的一

定类型的信息，并做出一定关于在发射机接收机处的信号处理的假定。一般，更复杂的传输方案可以获得接近最优的频谱效率，这是通过将不同量的发射功率分配给不同容量的空间子信道并在这些子信道上发送之前对数据流进行预调整。然而，这些传输方案需要关于 MIMO 信道更多的信息，这可能在接收机处很难获得，且还需要空中链接资源以报告给发射机。较不复杂的传输方案可以在有限范围的操作条件上提供较好的性能，但需要较少的信道信息。

因此领域内需要一种能在 MIMO 系统内发送数据以获得高频谱效率并减少复杂度的技术。

概述

在此提供一些在多信道通信系统内的可用传输信道上发送数据的方法，以获得更高的总系统频谱效率和/或其他好处。传输信号可以对应 MIMO 系统的空间子信道、OFDM 系统的频率子信道或 MIMO-OFDM 系统内的频率子信道的空间子信道。

在一方面，多个传输方案被选择性地用于提供接近最优的总效率。每种传输方案取决于在发射机处是否有全或部分信道状态信息(CSI) (在以下描述) 在传输信道上传输前在发射机处处理数据。对于部分 CSI 传输方案，数据流可以在每个发射天线上被发送(例如在天线的峰值发射功率)。 N_T 个发射天线的有或一个子集可以用于在任何时刻的数据传输。

对于全 CSI 传输方案，一个或多个数据流基于全 CSI 处理(或其变体，如下描述)在发射机处经处理，并在 MIMO 信道上发送。全 CSI 传输方案包括灌水传输方案、“选择性信道求逆”传输方案、“均匀”传输方案、“主本征模式波束成形”传输方案以及“波束操纵”传输方案，所有都依赖于发射机处的全 CSI 处理。灌水传输方案将更多的发射功率分配给噪声较少的传输信道，而将更少的发射功率分配给噪声较多的传输信道。灌水传输方案是最优的，且可以获得容量。选择性信道求逆传输方案将发射功率不均匀地在选择的传输信道上分配，使得检测后 SNR 对于选定的传输信道类似。均匀传输方案将总发射功率均匀地在所有传输信道间分配，且波束成形传输方案将所有发射功率分配给带有最佳性能的单个传输信道。波束操纵传输方案均匀地将总发射功率分配给所有用于发送单个数据流的发射天线，但数据流从这些发射天线以合适的相位被发送。一般，任何数量和类型的传输方案可以为多模式 MIMO 系统用于提供改

善的总性能。

每个传输方案可以为特定操作条件范围提供好或接近最优性能，性能可以由操作信号对噪声和干扰比(SNR)量化。这些多个不同类型的传输方案(即基于部分 CSI、全 CSI 等)可以以每部分的方式经组合以形成“多模式”传输方案，这覆盖了 MIMO 系统支持的全范围 SNR。用于在任何给定时刻发送数据的特定传输方案然后取决于在该时刻系统经历的特定操作条件。

在特定实施例中，提供一方法，用于在多信道通信系统内的多个传输信道上发送数据。根据该方法，开始时确定系统的操作条件(即工作 SNR)，且从多个可能的传输方案中基于确定的操作条件和发射机处可用的信道状态信息量而选择特定传输方案。每个传输方案用于相应的工作 SNR 范围。要发送的一个或多个数据流然后基于选定的传输方案被确定。一个或多个数据流然后基于选定的传输方案和可用 CSI 而经处理。例如，用于每个数据流的数据速率和编码和调制方案可以基于 CSI 被确定。在一实施例中，如果工作 SNR 在阈值 SNR 以上，则选用部分 CSI 传输方案，且如果工作 SNR 在阈值 SNR 以下，则选用波束成形传输方案。

本发明的各个方面和实施例在以下进一步详述。本发明还提供实现本发明的各个方面、实施例和特征的方法、处理器、发射机单元、接收机单元、基站、终端、系统和其他装置和元件，如以下将详述。

附图的简要描述

通过下面提出的结合附图的详细描述，本发明的特征、性质和优点将变得更加明显，附图中相同的符号具有相同的标识，其中：

图 1 示出使用灌水、带有 MMSE-SC 的部分 CSI 以及波束成形传输方案的 4x4 MIMO 系统可获得的三张效率曲线图；

图 2 是基于多模式传输方案在 MIMO 系统内在可用传输信道上发送数据的过程实施例流程图；以及

图 3 是发射机系统和接收机系统的实施例框图。

详细描述

在此描述的数据传输技术可以用于各种多信道通信系统。该种多信道通信系统包括多输入多输出(MIMO)通信系统、正交频分多路复用(OFDM)通信系统、

利用 OFDM 的 MIMO 系统(即 MIMO-OFDM 系统)以及其他。多信道通信系统还实现码分多址(CDMA)、时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)或一些其他多址技术。多址通信系统可以支持多个终端(即用户)的进发通信。为了清楚起见,本发明的一些方面和实施例特定为诸如多天线无线通信系统的 MIMO 系统描述。

多输入多输出(MIMO)通信系统使用多个(N_T)发射天线和多个(N_R)接收天线进行数据传输。由 N_T 个发射天线和 N_R 个接收天线形成的 MIMO 信道可能被分解为 $N_R \times N_T$ MIMO 系统,且可以被分解为 N_S 个独立信道,其中 $N_S \leq \min\{N_T, N_R\}$ 。 N_S 个独立信道的每个还被称为 MIMO 信道的空间子信道(或传输信道)。空间子信道的数目由 MIMO 信道的本征模式数目确定,这接着取决于信道响应矩阵 \underline{H} ,该矩阵描述 N_T 个发射天线和 N_R 个接收天线间的响应。

信道响应矩阵 \underline{H} 的元素由独立高斯随机变量组成,如下:

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $h_{i,j}$ 是第 j 个发射天线和第 i 个接收天线间的耦合(即复数增益)。

MIMO 系统的模型可以表示为:

$$\underline{y} = \underline{H}\underline{x} + \underline{n}, \quad (2)$$

其中

\underline{y} 是接收到的向量,即 $\underline{y} = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_{N_R}]^T$, 其中 $\{y_j\}$ 是在第 j 个接收天线上接收到的项,且 $i \in \{1, \dots, N_R\}$;

\underline{x} 是发送的向量,即 $\underline{x} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{N_T}]^T$, 其中 $\{x_i\}$ 是从第 i 个发射天线上发送的项,且 $j \in \{1, \dots, N_T\}$;

\underline{H} 是 MIMO 信道的信道响应矩阵;

\underline{A} 是数据流 $\{A_i\}$ 的幅度的对角矩阵;

\underline{n} 是一加性高斯白噪声(AWGN),其均值向量为 $\underline{0}$,且协方差矩阵为 $\underline{\Lambda}_n = \sigma^2 \underline{I}$,其中 $\underline{0}$ 是零向量, \underline{I} 是单位矩阵,对角线为 1,其余为零,且 σ^2 是噪声方差;以及

$[\cdot]^T$ 表示 $[\cdot]$ 的转置。

为了简洁, MIMO 信道被假设为平缓衰落窄带信道。在该情况下,信道响应矩阵 \underline{H} 的元素是标量,且每个发射-接收天线对间的耦合 $h_{j,i}$ 可以由单个标量值

表示。然而，在此描述的技术还可以用于带有在不同频率处的信道增益的频率选择信道。在该种频率选择信道中，操作带宽可以被分成多个(相等或不等带宽)的频带，使得每个频带被认为平缓衰落信道。然后可以为每个频带使用特定传输方案，这受到一定限制，诸如将给定发射天线的所有频带的总发射功率维持在天线的峰值发射功率内。这样，单个频带的信道响应可以在数据传输内得到考虑。

由于传播环境内的散射，从 N_T 个发射天线发送的 N_S 个数据流相互在接收机处干扰。多个数据流可以在空间子信道上使用信道状态信息(CSI)被发送，CSI 描述 MIMO 信道的特性。CSI 可以被归类为“全 CSI”或“部分 CSI”。全 CSI 包括在 $(N_r \times N_T)$ MIMO 矩阵内发射-接收天线对间传播路径的充分特性(例如幅度和相位)以及数据流的调制/编码信息。部分 CSI 可以包括例如数据流的信号对噪声和干扰比(SNR)。全或部分 CSI 可以在接收机处被确定(例如基于接收到的导频和/或话务数据)并报告给发射机。

取决于在发射机处是否有全或部分 CSI 可以使用不同的传输方案。当全 CSI 可用时，数据流可以在 MIMO 信道的本征模式上被发送。这可以通过在发射机处基于从信道响应矩阵 H 导出的(右)本征向量集合对数据流预调整而获得，如下所述。在接收机处，发送的数据流可以通过将接收到的码元流乘以(左)本征向量集合而被恢复，该本征向量基于矩阵 H 导出。全 CSI(或本征模式)传输方案因此取决于已知信道响应矩阵 H 。全 CSI 传输方案和该方案的变体在以下详细描述。

当只有部分 CSI 时，数据流可以从发射天线被发送而不在发射机处进行预调整。在接收机处，接收到的码元流根据特定空间或空时接收机处理技术经处理以试图分离数据流。部分 CSI 传输方案还在以下详细描述。

对于全 CSI 和部分 CSI 传输方案，每个数据流的数据速率和编码和调制取决于数据流获得的 SNR。每个数据流的 SNR 可以在接收机处被估计。用于每个数据流的描述估计的 SNR 或特定编码和调制方案的信息可以被提供给发射机并用于在 MIMO 信道上传输前处理数据流。

当全 CSI 可用时，一种去除或减少数据流间干扰的技术是“对角线化”MIMO 信道，使得数据流实际上在正交空间子信道上被发送。一种对角线化 MIMO 信道的技术是在信道响应矩阵 H 上实现奇异值分解，这可以表示为：

$$\underline{H} = \underline{U}\underline{D}\underline{V}^H, \quad (3)$$

其中 \underline{U} 是 $N_R \times N_R$ 酉阵 (即 $\underline{U}^H \underline{U} = \underline{I}$);

\underline{D} 是 $N_R \times N_T$ 矩阵;

\underline{V} 是 $N_T \times N_T$ 酉阵; 以及

“H” 标识矩阵的复共轭。

矩阵 \underline{D} 的对角项是 $\underline{G} = \underline{H}^H \underline{H}$ 的本征值的方根, 用 λ_i 表示, 且 $i \in \{1, \dots, N_s\}$, 其中 $N_s \leq \min\{N_T, N_R\}$ 是可分辨数据流的数目。 \underline{D} 的所有非对角线项为零。

对角线矩阵 \underline{D} 因此包含沿着对角线的非负实值, 其余为零, 其中非负实值为 $d_i = \sqrt{\lambda_i}$ 。 d_i 指信道响应矩阵 \underline{H} 的奇异值。 奇异值分解是领域内已知的技术, 且在各种参考内描述。 一种该种参考为 Gilbert Strang 的书, 题为 “Linear Algebra and its Applications”, 第二版, Academic Press, 1980, 在此引入作为参考。

奇异值分解将信道响应矩阵 \underline{H} 分解为两个酉阵 \underline{U} 和 \underline{V} , 以及, 以及对角阵 \underline{D} 。 矩阵 \underline{D} 描述 MIMO 信道的本征模式, 这对应空间子信道。 酉阵 \underline{U} 和 \underline{V} 包括接收机和发射机响应的 “操纵” 向量 (或相应的左或右本征向量), 这可以用于对角线化 MIMO 信道。 尤其是, 为了对角线化 MIMO 信道, 信号向量 \underline{s} 可以在发射机处左乘矩阵 \underline{V} 以提供发送的向量 \underline{x} , 如下:

$$\underline{x} = \underline{V} \underline{s} \quad (4)$$

该向量 \underline{x} 然后在 MIMO 信道上被发送到接收机。

在接收机处, 接收到的向量 $\underline{y} = \underline{H} \underline{x} + \underline{n}$ 可以左乘矩阵 \underline{U}^H 以获得恢复的向量 \underline{r} , 如下:

$$\begin{aligned} \underline{r} &= \underline{U}^H \underline{H} \underline{V} \underline{s} + \underline{U}^H \underline{n} \\ &= \underline{D} \underline{s} + \hat{\underline{n}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\hat{\underline{n}}$ 是 \underline{n} 的简单旋转, 产生与 \underline{n} 有相同均值向量和协方差矩阵的加性高斯白噪声。

如等式 (4) 示出的, 信号向量 \underline{s} 左乘矩阵 \underline{V} 以及接收到向量 \underline{y} 和矩阵 \underline{U}^H 的左乘生成有效的对角矩阵 \underline{D} , 这是信号向量 \underline{s} 和恢复向量 \underline{r} 之间的传递函数。 因此, MIMO 信道被分解成 N_s 个独立、无干扰、正交和平行信道。 这些独立信道还被称为 MIMO 信道的空间子信道。 空间子信道 i 或本征模式 i 有等于本征值 λ_i 的增益, 其中 $i \in I$ 且集合 I 被定义为 $I = \{1, \dots, N_s\}$ 。 如果发射机被提供有信道响应矩阵 \underline{H} , 则可以实现 MIMO 信道的对角线化以获得 N_s 个正交空间子信道。

对于全 CSI 传输方案,可以在 N_s 个空间子信道即本征模式的每个上发送一个数据流。对于要用于数据传输的每个空间子信道,发射机被提供以(右)本征向量以及该子信道相关的调制/编码信息。因此如果所有的 N_s 都用于数据传输,则发射机被提供以或是信道响应矩阵 \underline{H} 或是酉阵 \underline{V} , 以及相关的调制/编码信息。

对于部分 CSI 传输方案,一个数据流可以在 N_r 个发射天线的每个上被发送(假设 \underline{H} 是满秩矩阵,且 $N_s = N_r = N_r$)。对于部分 CSI 传输方案,发射机不需要被提供以信道响应矩阵 \underline{H} 或酉阵 \underline{V} , 因为数据流在 MIMO 信道上传输前不经预调整。

对于部分 CSI 传输方案,各种接收机处理技术可以在接收机处用于处理接收到码元流以分离发送的数据流。这些接收机处理技术包括空间接收机处理技术(这可以用于带有平缓衰落非弥散信道)以及空时接收机处理技术(这可以用于带有频率选择性衰落的弥散信道)。空间接收机处理技术包括信道相关矩阵求逆(CDMI)技术以及最小均方误差(MMSE)技术。空时接收机处理技术包括 MMSE 线性均衡器(MMSE-LE)、判决反馈均衡器(DFE)以及最大似然序列估计器(MLSE)。一般这些空间和空时接收机处理技术需要接收机处信道响应矩阵的估计(但不是发射机处)。

“连续抵消/均衡以及干扰抵消”接收机处理技术(这还被称为“连续干扰抵消”或“连续抵消”接收机处理技术)还可以连同上述的空间或空时技术的任何一种一起使用以提供改善的性能。例如,连续干扰抵消还可以与 MMSE(即 MMSE-SC)一起使用以在接收机处处理接收到的码元流以恢复数据流。

各种接收机处理技术在以下美国专利申请中有描述:美国专利申请号 09/993087 内描述,题为“Multiple-Access Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) Communication System”,提交于 2001 年 11 月 6 日;美国专利申请序列号 09/8542325,题为“Method and Apparatus for Processing Data in a Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) Communication System Utilizing Channel State Information”,提交于 2001 年 5 月 11 日;以及美国专利申请序列号 09/826481 以及 09/956449,两者均题为“Method and Apparatus for Utilizing Channel State Information in a Wireless Communication System”,相应地提交于 2001 年 3 月 23 日以及 2001 年 9 月 18 日。这些申请被转让给本发明的受让人,并在此引入作为参考。

全 CSI 信息方案需要更多关于 MIMO 信道的信息(例如矩阵 H)，这一般在接收机处被导出，且报告给发射机。因此，实现全 CSI 传输方案需要更高的开销费用。部分 CSI 传输方案不需要该附加信息。

在一般 MIMO 系统内，可以对 N_T 个发射天线的每个施加 P_{\max} 的峰值发射功率。在该情况下，在发射机处所有 N_T 个发射天线可用的总发射功率 P_{tot} 可以表示为：

$$P_{\text{tot}} = N_T \cdot P_{\max} \quad (6)$$

总发射功率 P_{tot} 可以基于各种方案被分配给数据流。

多个传输方案可以基于全 CSI 传输方案而导出，每个该种传输方案取决于(部分)总发射功率如何被分配给本征模式。这些传输方案包括“灌水”传输方案、“选择性信道求逆”传输方案、“均匀”传输方案、“主本征模式波束成形”(或简单地“波束成形”)传输方案，以及“波束操纵”传输方案。还可以考虑更少、附加和/或不同的传输方案，且这在本发明的范围内。对于灌水传输方案总发射功率的分配使得将更多的发射功率分配给噪声较少的传输信道，而将更少的发射功率分配给噪声较多的传输信道。选择性信道求逆传输方案将发射功率不均匀地在选择的传输信道上分配，使得检测后 SNR 对于选定的传输信道类似。均匀传输方案将总发射功率均匀地在所有传输信道间分配，且波束成形传输方案将所有发射功率分配给带有最佳性能的单个传输信道。波束操纵传输方案均匀地将总发射功率分配给所有用于发送单个数据流的发射天线，但数据流从这些发射天线以合适的相位被发送。这些传输方案依赖于在发射机处对每个选用的传输信道的全 CSI 处理(或其变体)。这些各种基于全 CSI 的传输方案在以下详细描述。

灌水传输方案将总发射功率 P_{tot} 分配给本征模式，以最大化传输容量(即频谱效率)。灌水技术类似于将固定量的水灌入有不规则底部的容器，其中每个频率区段的每个本征模式对应容器底部的一个点，且在任何给定点的底部高度对应与该本征模式相关的信噪比(SNR)的倒数。低的高度因此对应高的 SNR，相反高的高度对应低的 SNR。总可用发射功率 P_{tot} 然后被“注入”该容器，使得容器内的较低点(即较高 SNR)首先被注满，然后注满较高点(即较低 SNR)。功率分布取决于总可用发射功率 P_{tot} 以及容器在底部上的深度。在所有可用的发射功率被注入后容器的水平面在容器的所有点上为常数。且在水面高度以上的点未

经注入(即本征模式的 SNR 低于一特定阈值的不用)。灌水技术由 Robert G. Gallager 在 “information Theory and Reliable Communication” 内描述, John Wiley and Sons, 1968, 在此引入作为参考。

容量被定义为信息可以以任意低的差错概率被发送的最高频谱效率, 且一般单位为比特每赫兹每秒 (bps/Hz)。一个 SNR 为 γ 的高斯信道容量可以被表示为:

$$C = \log_2(1 + \gamma) \quad (7)$$

对于带有受限总发射功率 P_{tot} 的 MIMO 系统, 灌水传输方案可以最优地将总发射功率分配给 N_s 个空间子信道, 以达到容量。灌水传输方案将总发射功率 P_{tot} 分布在本征模式内的方式使得带有最低噪声方差的本征模式(即最高 SNR)接收到总功率的最大部分。作为灌水结果分配给本征模式 i 的功率量可以用 P_i 表示, 其中 $i \in I$, 且其中:

$$P_{tot} = \sum_{i \in I} P_i \quad (8)$$

基于为本征模式 i 分配的发射功率 P_i , $i \in I$ 。本征模式 i 的有效 SNR γ_i 可以表示为:

$$\gamma_i = \frac{P_i \cdot \lambda_i}{\sigma^2}, \quad (9)$$

其中 λ_i 是子信道 i 上的信道增益且 σ^2 是 MIMO 信道的噪声方差, 假设在所有子信道上相同的噪声方差。 N_s 个空间子信道通过灌水传输方案获得的容量然后可以表示为:

$$C = \sum_{i=1}^{N_s} \log_2(1 + \gamma_i) \quad (10)$$

每个本征模式的频谱效率可以基于以 SNR 的特定单调递增函数而经确定。一个可以用于频谱效率的函数是等式(7)示出的容量函数。在该情况下, 本征模式 i 的频谱效率 ρ_i 可以表示为:

$$\rho_i = \log_2(1 + \gamma_i) \quad (11)$$

系统的总频谱效率是所有本征模式的频谱效率之和, 每个可以如等式(1)内所示的确定。

为 MIMO-OFDM 系统实现灌水功率分配的特定算法在美国专利申请序列号 09/978337 内描述, 题为 “Method and Apparatus for Determining power

Allocation in a MIMO Communication System”，提交于2001年10月15日。用于实现MIMO系统灌水功率分配的特定算法在美国专利申请序列号[代理人号020038]内描述，题为“Reallocation of Excess Power in a Multi-Channel Communication System”，提交于2002年1月23日。这些申请在此转让给本发明的受让人，并在此引入作为参考。

选择性信道求逆传输方案将总发射功率 P_{tot} 不均匀地分配到 N_s 个本征模式的选定本征模式上，使得在这些选定本征模式上发送的数据流的检测后SNR大致类似。对于该传输方案，较差的本征模式不被选用。类似的检测后SNR使得能对所有数据流使用相同的编码和调制方案，这可以简化在发射机和接收机处的处理。

用于分配发射功率以获得类似的检测后SNR的技术在以下美国专利申请序列号内描述：序列号为09/860274提交于2001年5月17日；序列号为09/881610，提交于2001年6月14日以及序列号09/892379，提交于2001年6月26日，三者的题为“Method and Apparatus for Processing Data for Transmission in a Multi-Channel Communication System Using Selective Channel Inversion”，被转让给本发明的受让人，并在此引入作为参考。

均匀传输方案将总发射功率 P_{tot} 均等地在所有 N_s 个本征模式上分配。这可以通过将 P_{tot}/N_s 分配给每个本征模式而获得。基于为本征模式 i 分配的发射功率 P_{tot}/N_s ， $i \in I$ ，本征模式 i 的有效SNR $\hat{\gamma}_i$ 可以被表示为：

$$\hat{\gamma}_i = \frac{P_{tot} \cdot \lambda_i}{N_s \cdot \sigma^2} \quad (12)$$

N_s 个空间子信道的均匀传输方案获得的频谱效率可以表示为：

$$\hat{C} = \sum_{i=1}^{N_s} \log_2(1 + \hat{\gamma}_i) \quad (13)$$

波束成形传输方案将总发射功率 P_{tot} 分配给单个本征模式。为了接近容量，总发射功率被分配给对应最高本征值 λ_{max} 的本征模式。给定了使用单个本征模式用于数据传输的限制，这最大化了SNR。单个(最佳)本征模式的有效SNR可以被表示为：

$$\tilde{\gamma} = \frac{P_{tot} \cdot \lambda_{max}}{\sigma^2} \quad (14)$$

本征值 λ_i ， $i \in I$ 可以按降序排序。在该情况下， λ_1 是最高本征值(即 $\lambda_1 = \lambda_{max}$)。

N_s 个空间子信道的波束成形传输方案获得的频谱效率可以表示为：

$$\tilde{C} = \log_2(1 + \tilde{\gamma}) \quad (15)$$

由于只有一个本征模式用于数据传输，等式(15)不包括在 N_s 个空间子信道上的求和，这是相应的灌水和平均传输方案的等式(10)和(13)的情况。

虽然波束成形传输方案基于在发射机处的全 CSI 处理，需要较少的信道状态信息以实现该传输方案，因为只使用一个本征值进行数据传输。尤其是，只有对应选定的本征模式的一个奇异向量需要提供给发射机，它然后使用该向量以在 MIMO 信道上传输之前对数据流进行预调整。该奇异向量可以在接收机处基于信道响应矩阵 H 导出，并提供给发射机。

波束操纵传输方案将总发射功率 P_{tot} 均匀地分配给用于发送单个数据流的所有发射天线。在低 SNR 处，灌水传输用于将总发射功率的一大部分分配给主本征模式，这是对应最高本征值 λ_{max} 的本征模式。对于波束成形传输方案，单个数据流在主本征模式上发送，且该数据流由与用于数据传输的每个发射天线相关联的复数增益值经比例缩放，该值由对应主本征模式的奇异向量确定。复数增益值的幅度确定了用于发射天线的发射功率量。

波束操纵传输方案类似于波束成形方案且在 MIMO 信道上发送单个数据流。然而，由于只发送了数据流，则不一定要对角线化传输信道或限制对应主本征模式的单个传输信道上的该数据流传输。波束操纵传输方案依赖主本征模式，它获得最佳性能，但将总发射功率不均匀地分配给所有用于数据传输的发射天线。这样，为数据流使用更高的发射功率，这会导致改善的性能。

对于波束操纵传输方案，对应最高本征值 λ_{max} 的本征模式开始时被标识(例如在接收机处)，且确定对应该本征模式的奇异向量。该奇异向量包括用于 N_T 个发射天线的 N_T 个复数增益的复数值。波束操纵传输方案从 N_T 个发射天线以全功率发送单个数据流但带有合适的相位，这些相位是奇异向量内的 N_T 个复数增益值的相位。因而，只是奇异向量中的 N_T 个元素的相位需要提供给发射机。数据流然后从 N_T 个发射天线以标准化的(例如全)发射功率但以主本征模式的相位被发送。这使得来自 N_T 个发射天线的传输可以被建设性地(即相干地)在接收机处被组合，这可以提供改善的性能。

多个传输方案还可以基于部分 CSI 传输方案导出。在一方案中，峰值发射功率 P_{max} 用于每个数据流，且 N_T 个数据流从 N_T 个发射天线使用部分 CSI 处理(即

在发射机处没有预调整)被发送。在另一方案中(这被称为“选择性部分 CSI 方案”),只有 N_T 个发射天线的选定天线用于数据传输,且一个数据流从每个选定的发射天线被发送(例如使用峰值发射功率)。还可以形成部分 CSI 传输方案的其他变体。

因此有多个传输方案可以用于数据传输。每个传输方案取决于全或部分 CSI 是否在发射机处可用。图 1 示出使用上述灌水、均匀和波束成形传输方案的实例 4x4 MIMO 系统获得的效率三条曲线图。效率是基于假设不相关复数高斯信道模型而确定的,其中 MIMO 信道经历加性高斯白噪声(AWGN)但没有其他干扰。

对于灌水传输方案,大量随机信道集合(即带有随机本征值的空间子信道集合)在开始时被生成。这些信道集合然后为不同的噪声方差 σ^2 离散值而经评估,其中每个噪声方差值对应特定“操作”SNR,如下所述。对于每个信道集合,灌水用于基于子信道的本征值为各种噪声方差值将总发射功率分配给集合内的空间子信道。每个集合内的空间子信道的有效 SNR 取决于子信道的本征值、分配的发射功率以及噪声方差,且可以如等式(9)内示出。每个信道集合的效率然后为每个噪声方差值确定,如等式(10)内示出。然后获得每个噪声方差值的所有信道集合的效率的统计平均。

对于波束成形传输方案,评估相同随机生成的信道集合,除了只选用对应最高本征值的本征模式。每个信道集合类似地被噪声方差 σ^2 的各个离散值而经评估,且为每个噪声方差值获得这些频率集合的效率统计平均。对于均匀传输方案,总发射功率均匀地被分配给每个随机生成的信道集合内的本征模式。还为各个离散噪声方差值评估每个集合,且为每个噪声方差值获得信道集合效率的统计平均。

如图 1 示出,每个传输方案获得的效率根据工作 SNR 绘制的。工作 SNR 是接收机处的加性高斯白噪声的功率的倒数,可以被定义为:

$$\gamma_w = \frac{1}{\sigma^2} \quad (16)$$

工作 SNR 是 MIMO 信道的操作条件的测量。如等式(16)示出,工作 SNR 和噪声方差 σ^2 反相关。为每个传输方案的各个噪声方差获得效率因此可以根据工作 SNR 而不是噪声方差而经绘制,这是为了理解简单。如图 1 示出,图 112 示出的灌水传输方案的频谱效率是三种传输方案中最佳的,且可以示出等于容

量。均匀和波束成形传输方案的效率相应地由图 114 和 116 示出。在低 SNR 处，波束成形传输方案接近最优(即灌水传输方案)，因为只有一个本征模式在这些 SNR 是活动的。在高 SNR 处，均匀传输方案接近灌水传输方案的最优性能。

图 114 示出的均匀传输方案的效率使用发射机处的全 CSI 处理而获得。尤其是，等式(13)指明效率 \hat{C} 可以基于空间子信道的有效 SNR $\hat{\gamma}_i$ 而获得，且等式(12)指示需要全 CSI(例如信道响应矩阵 \underline{H}) 以导出本征值 λ_i ，该值然后被用于确定有效 SNR。然而，如果在接收机处使用 MMSE-SC 接收机处理技术以处理并恢复发送的数据流，则可以示出对部分 CSI 传输方案也可以获得效率 \hat{C} 。如果在接收机处使用一些其他的接收机处理技术而不是 MMSE-SC 技术，则部分 CSI 传输方案的效率会小于等式(13)示出的。

为了获得灌水传输方案的最优效率，发射机需要 MIMO 信道的完全知识，即全 CSI。全 CSI 可以由信道响应矩阵 \underline{H} 以及噪声方差 σ^2 提供。信道响应矩阵 \underline{H} 然后可以经评估(例如使用奇异值分解)以确定矩阵 $\underline{G} = \underline{H}^H \underline{H}$ 的本征模式和本征值。总发射功率然后基于本征值和噪声方差使用灌水传输方案而分配给本征模式。

灌水传输方案可能不是较佳或对于一些 MIMO 系统由于各种因素而不可用。首先，全 CSI 可能很难获得(例如一般在接收机处)，因为这会需要每个发射-接收天线对之间的信道增益测量。需要第二附加空中链路资源以从接收机将所有本征模式的全 CSI 报告回发射机。第三，可能需要更高的准确度(即更多的比特)表示信道增益，因为任何差错会转换成对应的正交性的丢失。第四，如果 MIMO 信道是时变的，则信道增益对测量和报告延时更敏感。这些因子会使得灌水方法不能用于一些 MIMO 系统。

在一方面，似乎次优的效率但需要更少的 CSI 以实现的多个传输方案被选择性地用于提供接近最优的总效率。这些次优传输方案可以包括例如上述的部分 CSI 传输方案(例如带有 MMSE-SC 接收机处理)以及波束成形传输方案(或波束操纵传输方案)。还可以使用不同和/或附加的传输方案，且在本发明的范围内。

通过提供给发射机必要的 CSI 可以为次优传输方案获得“接近最优”的总性能。该 CSI 可以包括在 N_s 个本征模式上的数据传输的“处理后”SNR，如在接收机处在实现了空间接收机处理之后确定的，如以下描述。处理后 SNR 可以为发射机用于(1)从多个可能的传输方案中选择特定的用于数据传输的传输方案，(2)为每个数据流选择要用的数据速率和编。

对于波束形成方案，与所述本征模式(例如对应最高本征值 λ_{\max} 的)相关的标量的奇异向量 \underline{y} 被提供给发射机并用于波束形成该本征模式上的数据传输。该接收机将接收到的向量 \underline{y} 在乘对应的奇异向量 \underline{u} 以恢复发送的数据流。

为了只使用部分 CSI 获得高性能，接收机可以使用 MMSE-SC 接收机处理技术，这会获得由均匀传输方案获得的频谱效率，该种情况需要全 CSI。

随着 SNR 减少，灌水传输方案将总发射功率的较大一部分分配给带有更佳性能的主本征模式。在一些阈值 SNR γ_{th} 处，更好的策略是将总发射功率分配给对应最大本征值的本征模式，如图 1 示出，波束成形方案的性能(图 116)在逐渐变低的 SNR 处接近灌水传输方案的最优效率(图 112)。相反，随着 SNR 增加，相对于总功率，灌水传输方案分配的每本征模式功率差减少，且功率分配更佳均匀。随着 SNR 增加，噪声方差 σ^2 减少，且不同本征模式的上升(这被确定为 σ^2 / λ_i)变低。如图 1 示出的，均匀传输方案和带有 MMSE-SC 方案的部分 CSI 的性能(图 114)在逐渐变高的 SNR 处接近灌水传输方案的效率。

在接收机处带有 MMSE-SC(或等价方案)的部分 CSI 传输方案可以达到在一定条件下的均匀传输方案的频谱效率，但没有均匀传输方案要求的全 CSI 相关的额外“费用”。如图 1 可见，带有 MMSE-SC 方案的部分 CSI 的频谱效率在低 SNR 处大大减少。

在一方面，MIMO 系统可以有利地利用多个传输方案(例如带有 MMSE-SC 方案和波束成形或波束操纵传输方案的部分 CSI)以提供更宽 SNR 范围上改善的性能。MIMO 系统使用的每个传输方案可以对应相应的操作模式。“多模式”MIMO 系统然后可以在各种支持的操作模式间切换(例如部分 CSI 和波束成形模式)，这取决于信道(或操作)条件。这样，对于给定操作条件提供最佳性能的传输方案可以选用于提供高性能。

图 1 还示出使用部分 CSI(带有 MMSE-SC)和波束成形传输方案的多模式 MIMO 系统可以获得曲线图 120(用圈点表示)。在任何工作 SNR 该多模式系统可获得的 C_{mm} 可以被表示为：

$$C_{mm} = \max(\hat{C}, \tilde{C}) , \quad (17)$$

其中 \hat{C} 和 \tilde{C} 是等式(13)和(15)给出的使用 MMSE-SC 和波束成形传输方案的部分 CSI 的频谱效率。使用这两个传输方案效率的最大损失发生在接近工作 SNR $\gamma_{op} = 0$ dB 处，且对于使用四个发射天线和四个接收天线的该示例 MIMO 系统大致为 1.75 dB。实现该多模式系统后，效率损失在低和高 SNR 处均减少。如图 1 示出，波束成

形传输方案用于为 MIMO 系统提供扩展操作范围(即覆盖低 SNR)。带有 MMSE-SC 和波束成形传输方案的部分 CSI 的性能采用不相关信道模型。随着信道越来越相关,在接收机处的可分辨数据流减少。因此,带有 MMSE-SC 的部分 CSI 和波束成形传输方案的交叉转移到更高的 SNR,且波束成形传输方案变成在低端更大 SNR 范围选择的操作模式。

在此描述的一些传输方案(例如波束成形传输方案)还可以为系统使用。还可以使用其他传输方案,且这在本发明范围内。例如,可以使用“选择性本征模式”传输方案以均匀地在 N_s 个本征模式子集间分配总发射功率。例如如果两个或多个本征模式获得一些阈值 SNR 以上的有效 SNR,则可以选用该方案。还可以使用“选择性部分 CSI”传输方案,其中只有一些发射天线用于数据传输,且剩余发射天线会被关闭。

还可以实现在此描述的传输方案的变体,且这在本发明的范围内。例如,还可以使用发射分集方案,其中单个数据流在以全功率在所有 N_t 个发射天线上被发送而没有任何波束成形。对于带有 MMSE-SC 方案的部分 CSI,这在一定条件下与均匀传输方案产生相同频谱效率,用于给定数据流的实际发射功率可以经调整为给定(量化)数据速率需要的最小量。

一般,任何数量和类型的传输方案还可以为多模式 MIMO 系统用于提供改善的总性能。每个传输方案可以提供在一些操作条件下(例如特定 SNR 范围)提供较好或接近最优性能。这些多个传输方案然后可以分片方式经组合以形成多模式传输方案,该方案覆盖了 MIMO 系统支持的所有操作条件(例如全 SNR 范围)。

图 1 示出三种(灌水、均匀和波束形成)的每种获得的频谱效率,这一般为真。然而图 1 示出的频谱效率不考虑与奇异向量的量化、信道相关和其他因素相关的损失。

一般,在任何给定时刻每个传输方案获得的频谱效率是工作 SNR 以及该时刻信道的函数。因此,为了获得高性能,当选择使用哪个传输方案时,信道(和其他因素)还可以被考虑。对于慢变信道,实时信道估计可以用于评估可能的传输方案。对于较快变的信道,可以获得信道的时平均,并用作信道估计。

用于任何给定时刻的数据传输的特定传输方案可以以各种方式选择。传输方案选择取决于系统在该时刻经历的特定操作条件,且可以进一步考虑其他因素。以下描述选择传输方案的几个方法。

在选择传输方案的一方法中，用于数据传输的特定传输方案只基于工作 SNR 而被选择。该方法易于实现且可以提供期望的性能水平。

在另一选择传输方案的方法中，接收机评估每个可能的传输方案，并选择产生最佳频谱效率的传输方案。对于只支持波束成形和部分 CSI 传输方案的系统，接收机可以评估波束成形方案(使用量化的奇异向量)以及带有 MMSE-SC(或一些其他接收机处理)的部分 CSI 方案。接收机然后可以选择产生最高吞吐量的传输方案，并将该信息提供给发射机。

在另一选择传输方案的方法中，接收机评估每个可能的传输方案，并基于可获得频谱效率和其他考虑选择一个传输方案。例如，接收机可以评估波束成形和均匀传输方案达到的性能。如果频谱效率比(例如波束成形频谱效率/均匀频谱效率)大于某一阈值，则选择波束成形传输方案。否则，选用部分 CSI 传输方案。均匀传输方案一般比带有 MMSE-SC 方案的部分 CSI “更容易”被评估(较少的计算代价，更快)，且可以用作替代(接收机可以评估均匀传输方案的性能，因为它能获得全 CSI)。然而，由于一些实现损失，均匀传输方案的频谱效率不完全等于带有 MMSE-SC 的部分 CSI 方案的效率。另外，有与波束成形传输方案相关联的量化损失。因此，可以选择阈值以考虑这些各种因素。

还可以设计选择在任何给定时刻使用的特定传输方案的其他方法，且这在本发明的范围内。一般，可以评估任何数量的可能传输方案(或其等价)，且用于数据传输的特定传输方案可以基于各种因素而被选择，诸如(1)可获得的频谱效率，(2)估计的实现损失等。

图 2 是过程 200 的实施例流程图，用于基于多模式传输方案在 MIMO 系统内发送数据。开始时，确定 MIMO 系统的操作条件(步骤 212)。操作条件可以由工作 SNR 量化，这可以基于如等式(16)示出的噪声方差和/或其他因子而经确定。操作条件可以基于连同数据发送的导频而经估计，如领域内已知的。

然后从多个传输方案中基于确定的操作条件选择特定传输方案(步骤 214)。如上所述，MIMO 系统可以支持任何数量的传输方案。用于数据传输的特定传输方案可以通过将工作 SNR 与一个或多个阈值 SNR 比较而确定。如果 MIMO 系统只支持部分 CSI 以及波束成形方案，则如果工作 SNR 等于或大于阈值 SNR γ_{th} ，则选择部分 CSI 方案，且如果工作 SNR 小于阈值 SNR，则选择波束成形方案。

然后确定要发送的数据流数，其数目取决于选定的传输方案(步骤 216)。

例如，单个数据流可以在对应波束成形传输方案的最高本征值的单个本征模式上被发送，且对于部分 CSI 传输方案可以在 N_T 个发射天线上发送 N_T 个数据流。系统可用的总发射功率 P_{tot} 然后基于选定传输方案(步骤 218)被分配给一个或多个数据流。一个或多个数据流然后基于选定的传输方案并根据分配的发射功率以及可用的 CSI 经处理(步骤 220)。图 2 内示出的过程可以在每个传输间隔内被实现，且这对应调度间隔。

在此描述的传输技术还可以用于其他多信道通信系统，诸如 OFDM 系统、MIMO-OFDM 系统等。

OFDM 系统有效地将系统带宽分成多个 (N_F) 频率子信道，这一般被称为频率区段即子带。每个频率子信道与相应的子载波(或频调)相关联，在其上进行数据调制。在每个时隙内，时隙是取决于频率子信道带宽的特定时间间隔，可以在 N_F 个频率子信道的每个上发送调制码元。对于 OFDM 系统，每个频率子信道可以被称为传输信道，且对于 OFDM 系统有 $N_C = N_F$ 个传输信道。

OFDM 系统的频率子信道可以经历频率选择性衰减(即对于不同频率子信道不同的衰减量)。频率子信道的特定响应取决于发射和接收天线间的传播路径的特性(例如衰落和多径效应)。因此，可以为给定的发射功率量为不同的频率子信道获得不同的有效 SNR。在该情况下，可以为 N_F 个频率子信道选用特定传输方案，其方式类似于上述本征模式的方式。

MIMO-OFDM 系统包括 N_S 个本征模式的每个的 N_F 个频率子信道。每个本征模式的每个频率子信道可以被称为传输信道，且 MIMO-OFDM 系统有 $N_C = N_F \cdot N_S$ 个传输信道。MIMO-OFDM 系统内的每个本征模式的频率子信道可能经历类似的不同信道条件，且对于给定发射功率量可能获得不同的 SNR。在该情况下，可以为 N_F 个频率子信道的每个选用特定的传输方案，其方式类似于上述本征模式方式。然而，由于每个发射天线由 P_{max} 的峰值发射功率限制，则用于给定发射天线的所有频率子信道的总发射功率被限制在 P_{max} 。

对于 MIMO-OFDM 系统，所有传输信道(即对于空间和频率维)可以在确定用于数据传输的特定传输方案时考虑。或者，传输方案选择的实现可以实现在任何给定时间只考虑一维。

在此描述的技术可以用于传输信道组。每个组可以包括任何数量的传输信道且可以与相应的操作点相关联。每个组可以包括例如用于独立数据流的传输信道，数据流与特定的数据速率和特定的编码和调制方案相关。对于多址通信

系统，每个组可以与要分配给不同接收机的传输信道相关联。

对于可能经历频率选择性衰落的宽带 MIMO 系统，操作带宽可以被分成多个(相等或不等)的频带，使得每个频带可以被认为是平缓衰减信道。在该情况下，信道响应矩阵 H 的每个元素是线性传递函数而不是标量，且每个发射-接收天线对之间的耦合 $h_{i,j}$ 可以用 N_F 个标量值向量表示，每个频带一个标量值。

可以为宽带 MIMO 系统使用各种传输方案，其中一些描述如下。

在宽带 MIMO 系统的第一传输方案内，为每个频带使用波束成形。在该第一传输方案的一实现中，最大本征值开始时为每个频带确定，且选用对应该本征值的本征模式。这些本征模式的“最优”功率分配可以基于在发射机处对于所有 N_T 个发射天线可用的总发射功率 P_{tot} 而经确定。该功率分配可以使用灌水获得，如在以上美国专利申请序列号 09/978337 内描述的。 N_F 个数据流然后可以经处理并在 N_F 个频带的 N_F 个选定本征模式上被发送。

取决于信道响应矩阵 H 以及噪声方差 σ^2 ，在 N_F 个选定的本征模式上发送的每个数据流可以获得不同的检测后 SNR。在一实施例中，每个数据流基于其检测后 SNR 而为数据流选择的相应编码和调制方案经编码并经调制。在另一实施例中，分配总发射功率 P_{tot} ，使得为所有数据流获得大致相同的检测后 SNR。对于该实施例，可以为所有数据流使用公共的编码和调制方案，这可以简化发射机和接收机处的处理。

分配发射功率以获得类似的检测后 SNR 的技术在前述的美国专利申请序列号 09/860274、09/881610 以及 09/892379 内有描述。在发射机和接收机处宽带 MIMO 系统的处理数据技术在前述美国专利申请序列号 09/993087 以及序列号 10/017308 内有描述，题为“Time-Domain Transmit and Receive Processing with Channel Eigen-mode Decomposition with MIMO Systems”，提交于 2001 年 12 月 7 日。这些申请被转让给本发明的受让人，并在此引入作为参考。

在宽带 MIMO 系统的第二传输方案中，为每个频带使用部分 CSI 传输方案。在该第二传输方案的一实现中，每个发射天线的峰值发射功率 P_{max} 在 N_F 个频带间等分。然后可以处理 N_S 个数据流并在 N_F 个频带的每个上发送。在一实施例中，每个数据流可以基于其达到的检测后 SNR 经编码和调制。在另一实施例中，为了简化在发射机和接收机处的编码和调制，发射功率可以不均匀地被分配，使得公共编码和调制方案可以用于 (1) 对于每个频带的所有 N_S 个数据流，(2) 对于每个空间子信道的所有 N_F 个数据流，(3) 对于所有 $N_S \cdot N_F$ 个传输信道的所

有数据流，或(4)对于每个传输信道组的所有数据流，这可以包括频率/空间子信道的任意组合。

对于选用于宽带 MIMO 系统内的每个传输方案，发射机被提供以在传输前合适处理数据所必须的信息。例如，对于第一传输方案，该方案为 N_F 个频带的每个使用波束成形，发射机可以被提供(1)这些 N_F 个频带的 N_F 个奇异向量以及(2)指示 N_F 个选定本征模式的每个的检测后 SNR 的信息，或用于每个数据流的编码和调制方案。对于第二传输方案，该方案为 N_F 频带的每个使用部分 CSI 传输，发射机可以被提供以(1)每个数据流或每个数据流组的检测后 SNR。

还可以为宽带 MIMO 系统使用基于全 CSI 或部分 CSI 处理的其他传输方案，且这在本发明的范围内。这些传输方案使得宽带 MIMO 系统考虑数据传输的单个频带的信道响应。

在一实施例中，为宽带 MIMO 系统的所有频带选用一个基于全 CSI 或部分 CSI 的传输方案，如以上为第一和第二传输方案描述的。这可以简化在发射机和接收机处的处理。在另一实施例中，每个频带可以被独立地处理，且可以为每个频带选用不同的基于全 CSI 或部分 CSI 的传输方案，这受到诸如将用于给定发射天线的所有频带的总发射功率维持在峰值发射功率 P_{\max} 内的一定限制。

对于宽带 MIMO 系统，均衡器可以在接收机处被使用，被用于均衡信道响应内的频率选择性衰落。在该情况下，窄带 MIMO 系统可用的传输方案可以用于宽带 MIMO 系统。

一般，期望简化发射机和接收机处的处理。这可以通过使用数据传输的尽可能少的编码和调制方案而获得(例如一个编码和调制方案)。一种实现方法是将发射功率不均匀地使用选择性信道求逆进行分配，以对传输信道获得类似的检测后 SNR。独立数据流然后可以经处理(例如基于公共编码和调制方案)并在这些传输信道的每个上被发送。或者，一个数据流可以被处理(例如基于公共编码和调制方案)并经多路分解并在这些多个传输信道上被发送。例如，选择性信道求逆可以连同上述的第一传输方案经应用，且一个数据流可以经处理并在 N_F 个频带的 N_F 个选定本征模式上被发送。

信道状态信息的量化

使用依赖于减少量的 CSI(例如处理后 SNR 和奇异向量)而不是全 CSI(例如信道响应矩阵)的传输方案可以大大减少从接收机报告到发射机的信道信息

量。依赖全 CSI 的传输方案需要 $N_R \cdot N_F$ 个复数信道增益加上噪声方差或等价信息以报告给发射机。相比之下，部分 CSI 传输方案只需要 N_s 个 SNR 值，其中 $N_s \leq \min\{N_T, N_R\}$ 。每个 SNR 值可以被映射到或由 MIMO 系统支持的特定“速率”表示。该速率指示在对应发射天线上用于数据流的特定数据速率和编码和调制方案。

波束成形传输方案只需要选定本征模式的 SNR 值(或一个速率值)以及用于在选定本征模式上波束形成数据传输的奇异向量 \underline{v} 。奇异向量由 N_T 个复数信道增益组成，每个发射天线一个。如果用于量化每个复数信道增益的每个实部或虚部需要的比特数表示为 Q ，则对奇异向量编码需要的总比特数为 $2N_TQ$ 。

列出为带有 N_T 个发射天线和 M 种可能速率的 MIMO 系统的部分 CSI 和波束成形传输方案的不同 CSI 类型表示需要的比特数。在表格 1 中，符号 $\lceil \cdot \rceil$ 表示括弧内量的下一最高整数值。

表格 1

	部分 CSI	波束成型
编码/调制	$N_T \lceil \log_2(M) \rceil$	$\lceil \log_2(M) \rceil$
奇异向量	0	$2N_TQ$

一般，其中为奇异向量量化复数信道增益为尽可能少的比特以减少要报告回发射机的信息量。然而，量化不应显著恶化性能。

表格 2 示出量化比特的不同数目的 SNR (dB 为单位) 的恶化， Q 用于表示奇异向量的复数信道增益的每维。表格 2 内示出的恶化是基于在波束成形模式操作的 4×4 MIMO 系统获得的。由于量化的 SNR 内的恶化只是量化比特数目的函数，而不是工作 SNR 的函数。该恶化示出是与从 2 到 5 的 Q 范围的不同值相关的。

表格 2

比特数 (Q)	2	3	4	5
SNR 恶化 (dB)	6.12	2.7	1.25	0.6

如表格 2 内示出的，可以使用四比特/维数(即 $Q=4$)或八个比特/复数信道增益以对奇异向量编码。五个比特/维数(即 $Q=5$)或十个比特/复数信道增益值提供更佳的性能。充分表示每个复数信道增益需要的比特数是 MIMO 系统的维

数的函数。例如 3×3 或 2×2 MIMO 系统每复数信道增益(实或虚)维数需要少于四个或五个比特。

系统

图 3 是发射机系统 310 和接收机系统 350 的实施例框图, 它们能实现在此描述的各个方面和实施例。

在发射机系统 310 处, 话务数据从数据源 312 被提供给发射(TX)数据处理器 314, 该处理器基于一个或多个编码方案对话务数据格式化、编码并交织以提供编码后数据。编码后话务数据然后可以与导频数据使用例如时分多路复用(TDM)或码分多路复用(CDM)方式在所有传输信道或其子集内经多路复用以用于数据传输。导频数据一般是以已知方式处理的已知数据模式。经多路复用的导频和编码后话务数据然后基于一个或多个调制方案(例如 BPSK、QSPK、M-PSK 或 M-QAM)经调制(即码元映射)以提供调制码元。每个传输信道或每个传输信道组的数据速率、编码、交织和调制可以由控制器 330 提供的各种控制确定。

TX MIMO 处理器 320 还可以进一步根据对应发射机系统 310 的当前操作模式的处理方案处理调制码元。每个传输方案可以与相应的操作模式相关联, 且每个操作模式可以对应调制码元的特定处理方案。对于部分 CSI 传输方案, TX MIMO 处理器 320 简单地将每个数据流的调制码元流发送到相应的发射机(TMTR) 322。对于波束成形传输方案, TX MIMO 处理器 320 基于与该本征模式相关联的奇异向量 \underline{v} 而预处理该选定本征模式的调制码元的单个流。预调整可以通过将每个调制码元乘以奇异向量的 N_T 项的每个而实现, 以提供 N_T 个标量化的码元。 N_T 个标量化码元流因此提供给奇异向量的 N_T 项。用奇异向量预调整有效地实现了数据流的波束成形。在两种情况下, N_T 个标量化或未经标量化的调制码元流提供给发射机 322a 到 322t。

每个发射机 322 接收并处理相应的码元流。对于 OFDM 系统, 每个发射机转换码元(例如使用反快速傅立叶变换(IFFT)以形成 OFDM 码元, 且进一步将循环前缀附加到每个 OFDM 码元以形成对应的传输码元。每个发射机将码元流转换成个或多个模拟信道, 并进一步将模拟信号调整(例如放大、滤波以及正交调制)以生成合适于在 MIMO 信道上发送的已调信号。来自发射机 322a 到 322t 的 N_T 个已调信号然后相应地从 N_T 个天线 324a 到 324t 被发送。

在接收机系统 350 处, 发送的已调信号由 N_R 个天线 352a 到 352r 接收, 且

从每个天线 352 接收到的信号被提供给相应的接收机 (RCVR) 354。每个接收机 354 调整 (例如滤波、放大并下变频) 接收到的信号并数字化经调整的信号以提供相应的采样流。每个采样流可以进一步经处理 (例如用恢复后的导频解调) 以获得对应的接收到码元流 (被标为 \underline{y})。

RX MIMO 处理器 360 然后基于多个空间接收机处理技术的一种接收并处理 N_r 个接收到的码元流以提供 N_r 个恢复的码元流 (被标为 \underline{r})。例如, RX MIMO 处理器 360 可以实现 CCMI、CCMI-SC、MMSE、MMSE-SC 或一些其他接收机处理技术。这些各种接收机处理技术在前述的美国专利申请序列号 09/993087 内描述。

接收 (RX) 数据处理 362 然后对恢复码元解调、解交织并解码。RX MIMO 处理器 360 和 RX 数据处理器 362 的处理与在发射机系统 310 处的 TX MIMO 处理器 320 和 TX 数据处理器 314 实现的互补。

RX MIMO 处理器 360 还可以为传输信道导出 SNR 估计、带有最高本征值 (最佳 SNR) 的奇异向量的信道增益等, 并将该信息提供给控制器 370。RX 数据处理器 362 还提供每个接收到帧或分组的状态、指示解码后结果的一个或多个其他性能度量以及可能的其他信息。控制器 370 收集有关的 CSI, 这可以包括从 RX MIMO 处理器 360 和 RX 数据处理器 362 接收到的一些或所有信息。该 CSI 然后由 TX 数据处理器 378 处理, 由调制器 380 调制、由发射机 354a 到 354r 调整, 并发送回发射机系统 310。

在发射机系统 310 处, 来自接收机系统 350 的已调信号由天线 324 接收、接收机 322 调整、解调器 340 解调并由 RX 数据处理器 342 处理以恢复接收机系统报告的相关 CSI。报告的 CSI 然后被提供给控制器 330 并用于选择传输方案并为 TX 数据处理器 314 和 TX MIMO 处理器 320 生成各种控制。

控制器 330 和 370 引导相应地在发射机和接收机系统处的操作。存储器 332 和 372 提供控制器 330 和 370 使用的程序代码和数据的相应存储。

为了实现上述的多模式传输技术, 控制器 330 从接收机 350 接收相关 CSI, 这包括处理后 SNR、奇异向量、和/或一些其他描述 MIMO 信道操作条件或特性的信息。控制器 330 然后 (1) 选择用于发送数据的特定传输方案, 以及 (2) 确定用于每个选定传输信道的速率。用于每个选定传输信道的速率 (即数据速率和编码和调制方案) 部分基于分配给数据流的发射功率量而经确定。功率分配和速率确定还可以由一些除了发射机系统之外的网络实体实现。

在此描述的多模式传输技术可以由各种方式实现。例如，这些技术可以在硬件、软件或其组合实现。对于硬件实现，用于控制数据流的发射功率的元件可以在以下元件内实现：一个或多个应用专用集成电路(ASIC)、数字信号处理器(DSP)、数字信号处理设备(DSPD)、可编程逻辑设备(PLD)、现场可编程门阵列(FPGA)、处理器、控制器、微控制器、微处理器、设计以实现在此描述的功能的其他电子单元或其组合。

对于软件实现，功率控制可以用实现上述功能的模块(例如进程、函数等)实现。软件代码可以被存储在存储器单元内(例如图3内的存储器332)并由处理器执行(例如控制器330)。存储器单元可以在处理器内或处理器外实现，在该情况下，它可以通过领域内各种方式通信耦合到处理器。

标题在此被包括用于参考并用于帮助定位某些部分。这些标题不是用于限制以下描述的概念，且这些概念可以应用到整个说明的其他分部。

上述优选实施例的描述使本领域的技术人员能制造或使用本发明。这些实施例的各种修改对于本领域的技术人员来说是显而易见的，这里定义的一般原理可以被应用于其它实施例中而不使用创造能力。因此，本发明并不限于这里示出的实施例，而要符合与这里揭示的原理和新颖特征一致的最宽泛的范围。

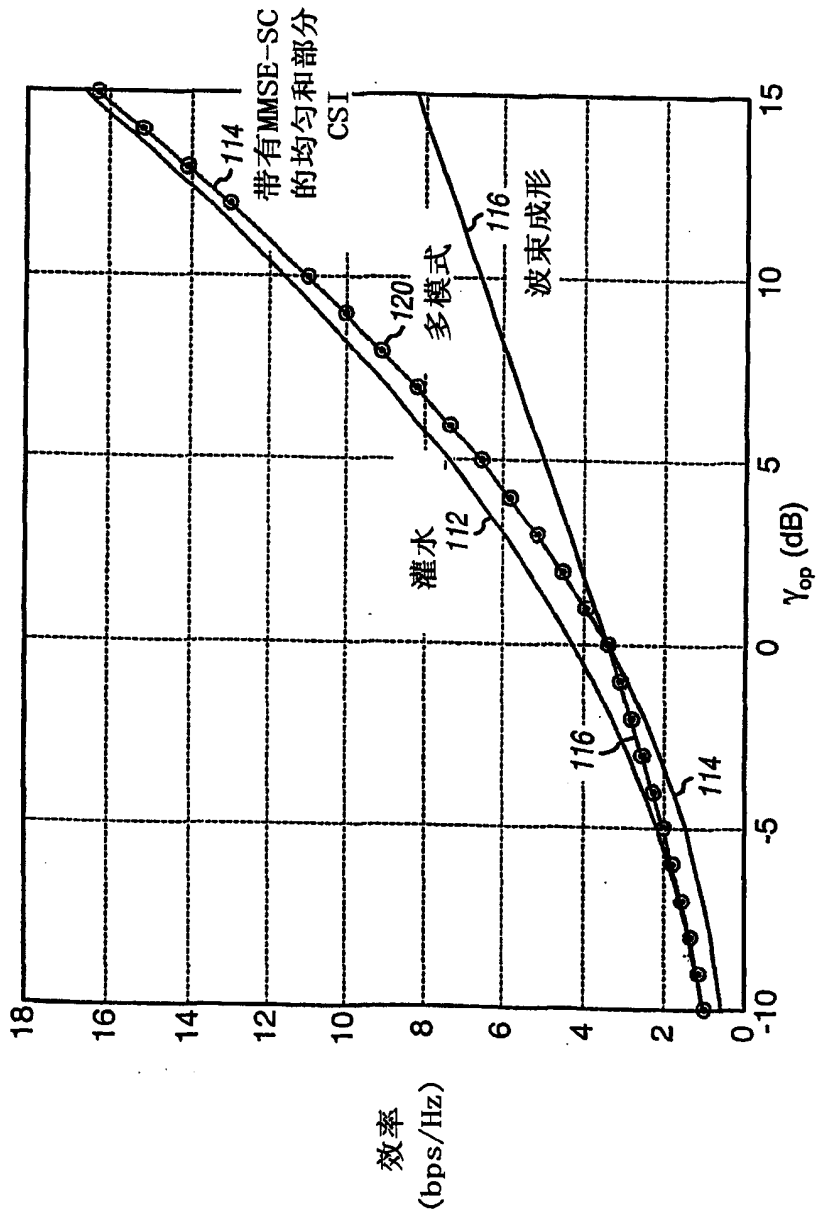


图 1

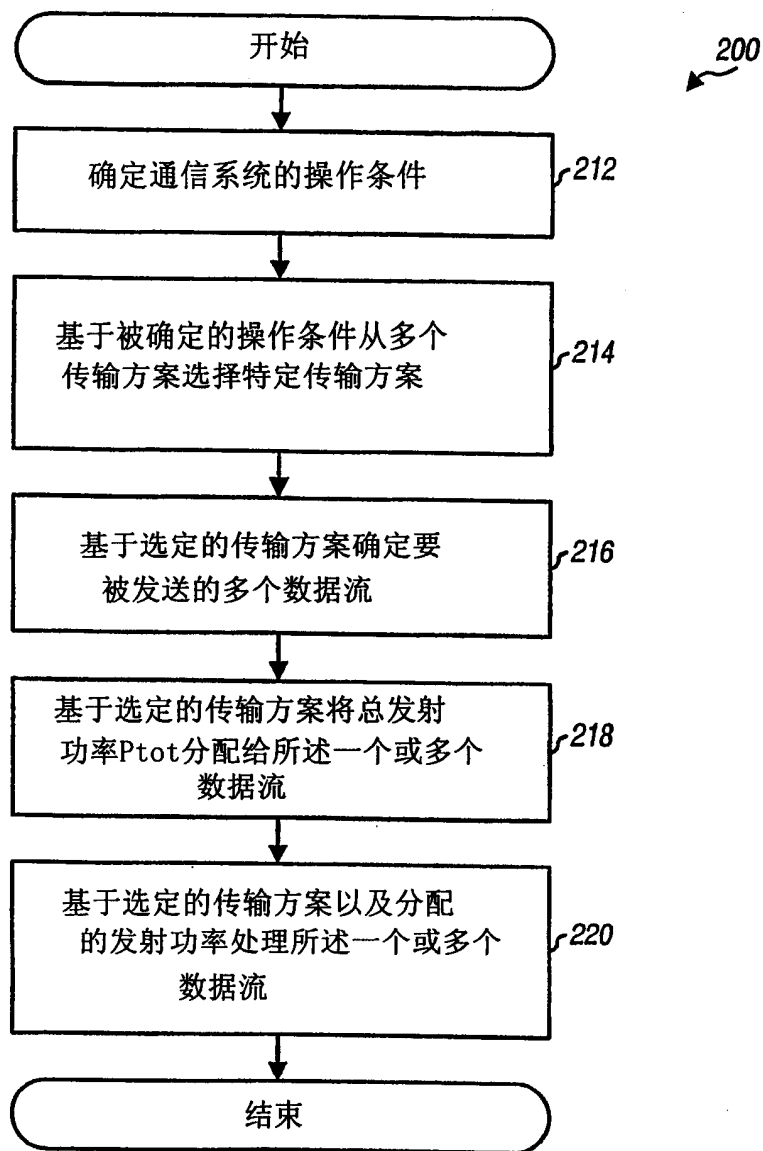


图 2

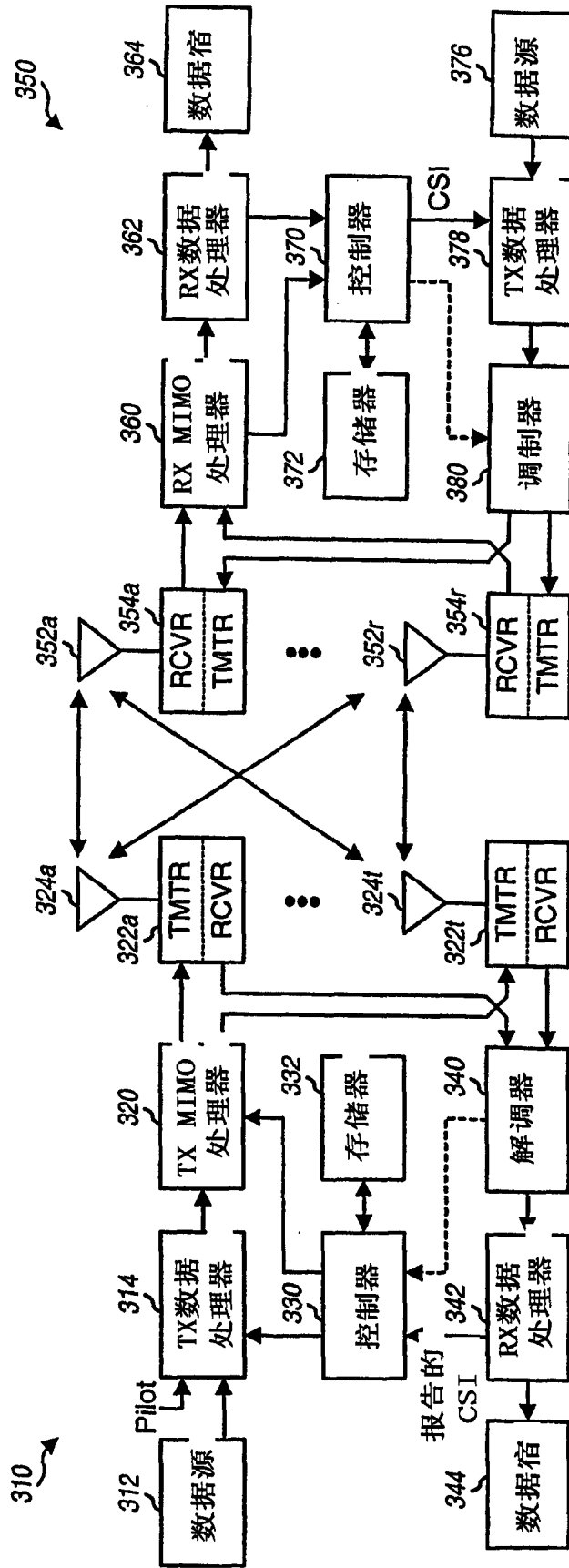


图 3