



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200580028939.8

[43] 公开日 2007年8月1日

[11] 公开号 CN 101010890A

[22] 申请日 2005.6.27  
 [21] 申请号 200580028939.8  
 [30] 优先权  
     [32] 2004.6.30 [33] US [31] 10/882,491  
 [86] 国际申请 PCT/US2005/022840 2005.6.27  
 [87] 国际公布 WO2006/004706 英 2006.1.12  
 [85] 进入国家阶段日期 2007.2.27  
 [71] 申请人 高通股份有限公司  
     地址 美国加利福尼亚  
 [72] 发明人 马克·S·华莱士  
     杰伊·罗德尼·沃尔顿  
     史蒂文·J·霍华德

[74] 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司  
 代理人 王 英

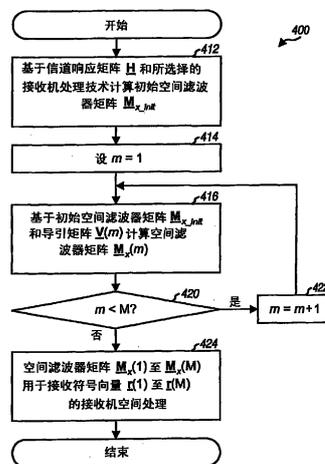
权利要求书6页 说明书22页 附图7页

[54] 发明名称

MIMO 通信系统中用于导引发射分集的空间滤波器矩阵的高效计算

[57] 摘要

本文描述了高效计算空间滤波器矩阵的技术。如果 MIMO 信道在一系列传输跨度内是相对静态的，则该信道的信道响应矩阵是高度相关的。在这种情况下，可以基于一个信道响应矩阵而导出初始空间滤波器矩阵，以及，基于该初始空间滤波器矩阵和用于上述传输跨度的导引矩阵来计算每个传输跨度的空间滤波器矩阵。如果 MIMO 信道不是静态的但也不突然改变，则信道响应矩阵是部分相关的。在这种情况下，可导出用于一个传输跨度的空间滤波器矩阵，该空间滤波器矩阵用于导出用于另一传输跨度  $m$  的初始空间滤波器矩阵。可基于初始空间滤波器矩阵，例如，使用迭代过程，来计算用于传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵。



1、一种在无线多输入多输出（MIMO）通信系统中导出空间滤波器矩阵的方法，包括：

确定初始空间滤波器矩阵；以及

基于所述初始空间滤波器矩阵和用于多个传输跨度的多个导引矩阵，导出用于所述多个传输跨度的多个空间滤波器矩阵。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述初始空间滤波器矩阵是基于用于 MIMO 信道的信道响应矩阵来确定的。

3、根据权利要求 2 所述的方法，其中，用于所述多个传输跨度中每个传输跨度的所述空间滤波器矩阵是基于所述初始信道响应矩阵和用于所述传输跨度的导引矩阵而导出的。

4、根据权利要求 2 所述的方法，其中，所述初始空间滤波器矩阵是进一步基于用于所述多个传输跨度中一个传输跨度的导引矩阵而确定的。

5、根据权利要求 3 所述的方法，其中，用于所述多个传输跨度中每个传输跨度的所述空间滤波器矩阵是基于所述初始信道响应矩阵、用于确定所述初始空间滤波器矩阵的所述导引矩阵以及用于所述传输跨度的导引矩阵而导出的。

6、根据权利要求 1 所述的方法，其中，数据是在 MIMO 信道的正交空间信道上传输的，以及其中，所述初始信道响应矩阵是根据全信道状态信息（全 CSI）技术而确定的。

7、根据权利要求 1 所述的方法，其中，数据是在 MIMO 信道的正交空间信道上传输的，以及其中，所述初始信道响应矩阵是根据最

小均方误差 (MMSE) 技术而确定的。

8、根据权利要求 1 所述的方法，其中，数据是在 MIMO 信道的空间信道上传输的，以及其中，所述初始信道响应矩阵是根据信道相关矩阵求逆 (CCMI) 技术而确定的。

9、根据权利要求 1 所述的方法，其中，数据是在 MIMO 信道的空间信道上传输的，以及其中，所述初始信道响应矩阵是根据最小均方误差 (MMSE) 技术而确定的。

10、根据权利要求 1 所述的方法，其中，发射实体使用所述多个导引矩阵对数据进行空间处理，从而实现发射分集。

11、根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述多个导引矩阵的元素是由  $+1$ 、 $-1$ 、 $+j$  和  $-j$  组成的集合中的成员，其中  $j$  是  $-1$  的平方根。

12、根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述多个传输跨度对应于多个符号周期。

13、根据权利要求 1 所述的方法，其中，所述多个传输跨度对应于多个频率子带。

14、根据权利要求 1 所述的方法，还包括：

利用所述多个空间滤波器矩阵，对在所述多个传输跨度内接收到的符号进行空间处理。

15、无线多输入多输出 (MIMO) 通信系统中的一种装置，包括：处理器，确定初始空间滤波器矩阵，以及，基于所述初始空间滤波器矩阵和用于多个传输跨度的多个导引矩阵，导出用于所述多个传输跨度的多个空间滤波器矩阵；以及

存储器，存储所述多个导引矩阵。

16、根据权利要求 15 所述的装置，其中，所述初始空间滤波器矩阵是基于用于 MIMO 信道的信道响应矩阵来确定的，以及其中，用于所述多个传输跨度中每个传输跨度的所述空间滤波器矩阵是基于所述初始信道响应矩阵和用于所述传输跨度的导引矩阵而导出的。

17、根据权利要求 15 所述的装置，其中，所述初始信道响应矩阵是根据全信道状态信息（全 CSI）技术、最小均方误差（MMSE）技术或信道相关矩阵求逆（CCMI）技术而确定的。

18、根据权利要求 15 所述的装置，其中，所述多个导引矩阵的元素是由+1、-1、+j 和-j 组成的集合中的成员，其中 j 是-1 的平方根。

19、根据权利要求 15 所述的装置，还包括：

空间处理器，利用所述多个空间滤波器矩阵，对在所述多个传输跨度内接收到的符号进行空间处理。

20、无线多输入多输出（MIMO）通信系统中的一种装置，包括：  
确定模块，确定初始空间滤波器矩阵；以及

导出模块，基于所述初始空间滤波器矩阵和用于多个传输跨度的多个导引矩阵，导出用于所述多个传输跨度的多个空间滤波器矩阵。

21、根据权利要求 20 所述的装置，其中，所述初始空间滤波器矩阵是基于用于 MIMO 信道的信道响应矩阵而确定的，以及其中，用于所述多个传输跨度中每个传输跨度的所述空间滤波器矩阵是基于所述初始信道响应矩阵和用于所述传输跨度的导引矩阵而导出的。

22、根据权利要求 20 所述的装置，其中，所述初始信道响应矩阵是根据全信道状态信息（全 CSI）技术、最小均方误差（MMSE）

技术或信道相关矩阵求逆 (CCMI) 技术而确定的。

23、根据权利要求 20 所述的装置，其中，所述多个导引矩阵的元素是由+1、-1、+j 和-j 组成的集合中的成员，其中 j 是-1 的平方根。

24、根据权利要求 20 所述的装置，还包括：

空间处理模块，利用所述多个空间滤波器矩阵，对在所述多个传输跨度内接收到的符号进行空间处理。

25、一种在无线多输入多输出 (MIMO) 通信系统中导出空间滤波器矩阵的方法，包括：

导出用于第一传输跨度的第一空间滤波器矩阵；

基于所述第一空间滤波器矩阵，确定用于第二传输跨度的第一初始空间滤波器矩阵；以及

基于所述第一初始空间滤波器矩阵，导出用于所述第二传输跨度的第二空间滤波器矩阵。

26、根据权利要求 25 所述的方法，其中，所述第一空间滤波器矩阵是基于在所述第一传输跨度中为 MIMO 信道获得的信道响应矩阵并进一步根据接收机空间处理技术而导出的。

27、根据权利要求 25 所述的方法，其中，所述确定第一初始空间滤波器矩阵包括：

处理所述第一空间滤波器矩阵，以剔除用于所述第一传输跨度的第一导引矩阵，以及其中，所述第一初始空间滤波器矩阵等于剔除了所述第一导引矩阵的所述第一空间滤波器矩阵。

28、根据权利要求 25 所述的方法，其中，所述确定第一初始空间滤波器矩阵包括：

处理所述第一空间滤波器矩阵，以剔除用于所述第一传输跨度的

第一导引矩阵，并纳入用于所述第二传输跨度的第二导引矩阵，以及其中，所述第一初始空间滤波器矩阵等于剔除了所述第一导引矩阵并纳入了所述第二导引矩阵的所述第一空间滤波器矩阵。

29、根据权利要求 25 所述的方法，其中，所述第二空间滤波器矩阵是使用迭代过程导出的，所述迭代过程对所述第一初始空间滤波器矩阵迭代地进行一组计算，从而获得所述第二空间滤波器矩阵的最终解。

30、根据权利要求 25 所述的方法，还包括：

基于所述第二空间滤波器矩阵，确定用于第三传输跨度的第二初始空间滤波器矩阵；以及

基于所述第二初始空间滤波器矩阵，导出用于所述第三传输跨度的第三空间滤波器矩阵。

31、根据权利要求 25 所述的方法，其中，所述第一和第二传输跨度对应于两个不同的符号周期。

32、根据权利要求 25 所述的方法，其中，所述第一和第二传输跨度对应于两个不同的频率子带。

33、无线多输入多输出（MIMO）通信系统中的一种装置，包括：

处理器，导出用于第一传输跨度的第一空间滤波器矩阵，基于所述第一空间滤波器矩阵确定用于第二传输跨度的第一初始空间滤波器矩阵，以及，基于所述第一初始空间滤波器矩阵导出用于所述第二传输跨度的第二空间滤波器矩阵。

34、根据权利要求 33 所述的装置，其中，所述处理器处理所述第一空间滤波器矩阵，以剔除用于所述第一传输跨度的第一导引矩阵，以及其中，所述第一初始空间滤波器矩阵等于剔除了所述第一导

引矩阵的所述第一空间滤波器矩阵。

35、根据权利要求 33 所述的装置，其中，所述处理器还基于所述第二空间滤波器矩阵确定用于第三传输跨度的第二初始空间滤波器矩阵，并基于所述第二初始空间滤波器矩阵导出用于所述第三传输跨度的第三空间滤波器矩阵。

36、无线多输入多输出（MIMO）通信系统中的一种装置，包括：  
第一空间滤波器矩阵导出模块，导出用于第一传输跨度的第一空间滤波器矩阵；

第一初始空间滤波器矩阵确定模块，基于所述第一空间滤波器矩阵确定用于第二传输跨度的第一初始空间滤波器矩阵；以及

第二空间滤波器矩阵导出模块，基于所述第一初始空间滤波器矩阵导出用于所述第二传输跨度的第二空间滤波器矩阵。

37、根据权利要求 36 所述的装置，其中，所述第一初始空间滤波器矩阵确定模块包括：

处理模块，处理所述第一空间滤波器矩阵，以剔除用于所述第一传输跨度的第一导引矩阵，以及其中，所述第一初始空间滤波器矩阵等于剔除了所述第一导引矩阵的所述第一空间滤波器矩阵。

38、根据权利要求 36 所述的装置，还包括：

第二初始空间滤波器矩阵确定模块，基于所述第二空间滤波器矩阵确定用于第三传输跨度的第二初始空间滤波器矩阵；以及

第三空间滤波器矩阵导出模块，基于所述第二初始空间滤波器矩阵导出用于所述第三传输跨度的第三空间滤波器矩阵。

## MIMO 通信系统中用于导引发射分集的空间滤波器矩阵的高效计算

### 发明领域

概括地说，本发明涉及通信，具体地说，本发明涉及在多输入多输出通信系统中用于数据传输的空间处理。

### 技术背景

MIMO 系统在发射实体处采用多个 ( $N_T$ ) 发射天线，以及在接收实体处采用多个 ( $N_R$ ) 接收天线，以进行数据传输。可以将  $N_T$  个发射天线和  $N_R$  个接收天线形成的 MIMO 信道分解成  $N_S$  个空间信道，其中  $N_S \leq \min\{N_T, N_R\}$ 。这  $N_S$  个空间信道可以用于并行传输数据来提高吞吐量和/或冗余地传输数据来提高可靠性。

每个空间信道可能会经受各种恶劣的信道状况，例如衰落、多径以及干扰影响。 $N_S$  个空间信道也可能会经受不同的信道状况，并可能实现不同的信号与噪声加干扰比 (SNR)。每个空间信道的 SNR 决定其传输容量，该传输容量通常通过在该空间信道上进行可靠传输的特定数据速率进行量化。对于时变无线信道来说，信道状况随时间而改变，并且，每个空间信道的 SNR 也随时间而改变。

为了提高性能，MIMO 系统可以利用某种形式的反馈，从而使得接收实体估计空间信道，并提供表示各空间信道的信道状况或传输容量的反馈信息。然后，发射实体可以基于该反馈信息调整各空间信道上的数据传输。但是，可能会由于各种原因而得不到反馈信息。例如，系统可能不支持来自接收实体的反馈传输，或者，无线信道的变化可能快于接收实体可以估计无线信道和/或发回反馈信息的速率。在任何情况下，如果发射实体不知道信道状况，那么，它需要以低速率发射数据，从而，即使在最差信道状况下，接收实体也可以可靠地对数据传输进行解码。该系统的性能将受制于预期的最差信道状况，这

是我们很不希望看到的。

为了提高性能（例如，当反馈信息不可用时），发射实体可以执行空间处理，从而，数据传输在一延长的时间段内观测不到最差的信道状况，如下所述。然后，可以将更高的数据速率用于数据传输。但是，该空间处理对发射实以及接收实体带来附加的复杂度。

因此，在该领域中，需要高效地执行空间处理的技术，以提高 MIMO 系统中的性能。

## 发明内容

下面描述由接收实体高效计算用于空间处理的空间滤波器矩阵的技术。发射实体可以使用全信道状态信息（“全 CSI”）或“部分 CSI”传输经由 MIMO 信道来发射数据，如下所述。发射实体也可以利用导引发射分集（STD）来提高性能。利用 STD，发射实体使用不同的导引矩阵进行空间处理，以便数据传输观测到全部有效信道，且不会在“差的”信道实现上受阻而停留一延长的时间段。接收实体对全 CSI 或部分 CSI 传输以及对导引发射分集进行互补性的接收机空间处理。如果 MIMO 信道是相对静态的或者不会突然改变，则可以高效计算用于接收机空间处理的空间滤波器矩阵。

如果 MIMO 信道在一系列的传输跨度内（例如，一系列的符号周期或频率子带）是相对静态的，则在这些传输跨度内 MIMO 信道的信道响应矩阵是高度相关的。在此情况下，可以基于信道响应矩阵和所选择的接收机处理技术导出初始空间滤波器矩阵，如下所述。然后，可以基于该初始空间滤波器矩阵和用于静态范围内各传输跨度的导引矩阵计算用于该传输跨度的空间滤波器矩阵。

如果 MIMO 信道不是静态的但也不突然改变，则用于不同传输跨度的信道响应矩阵是部分相关的。在此情况下，可以针对给定的传输跨度  $l$  导出空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_x(l)$ ，该矩阵可以用于导出用于另一传输跨度  $m$  的初始空间滤波器矩阵。然后，例如使用迭代过程，基于该初始空间滤波器矩阵，计算用于传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_x(m)$ 。可以在一系列相关的传输跨度内重复相同的处理，以便每个

新导出的空间滤波器矩阵可以用于计算用于另一传输跨度的另一空间滤波器矩阵。

可以对导引矩阵进行定义，以便可以简化空间滤波器矩阵的计算。下面将进一步详细描述本发明的各个方面和实施例。

## 附图说明

图 1 示出了 MIMO 系统中的发射实体和接收实体；

图 2 示出了使用导引发射分集进行数据传输的模型；

图 3A 和 3B 分别示出了在单载波 MIMO 系统和多载波 MIMO 系统中的数据传输；

图 4 和 5 分别示出了对用于全相关信道响应矩阵和部分相关信道响应矩阵的空间滤波器矩阵进行计算的过程；

图 6 的框图示出了接入点和用户终端；以及

图 7 的框图示出了用于计算空间滤波器矩阵的处理器。

## 具体实施方式

这里使用的“示例性的”一词意味着“用作例子、例证或说明”。这里被描述为“示例性”的任何实施例不应被解释为比其他实施例更优选或更具优势。

图 1 示出了 MIMO 系统 100 中的发射实体 110 和接收实体 150 的简单框图。在发射实体 110 中，发射 (TX) 空间处理器 120 对数据符号 (用向量  $\underline{s}(m)$  表示) 进行空间处理，以生成发射符号 (用  $\underline{x}(m)$  表示)。这里使用的“数据符号”是数据的调制符号，“导频符号”是导频信息的调制符号 (即发射实体和接收实体都先验得知的数据)，“发射符号”是从发射天线发送的符号，“接收符号”是从接收天线获得的符号，以及调制符号是用于某种调制方式 (例如，M-PSK、M-QAM 等) 的信号群中的点的复值。基于导引矩阵  $\underline{V}(m)$  和可能其它矩阵进行空间处理。发射机单元 (TMTR) 122 进一步修整发射符号，从而生成  $N_T$  个调制符号，其从  $N_T$  个发射天线 124 进行发射并经由 MIMO 信道。

在接收实体 150 中,发射的调制信号由  $N_R$  个接收天线 152 接收,并且,该  $N_R$  个接收信号由接收机单元 (RCVR) 154 进行修整,从而获取接收符号 (用向量  $\mathbf{r}(m)$  表示)。然后,接收 (RX) 空间处理器 160 使用空间滤波器矩阵 (用  $\mathbf{M}_x(m)$  表示) 对接收符号进行接收机空间处理 (或空间匹配滤波),从而获取“检测”数据符号 (用向量  $\hat{\mathbf{s}}(m)$  表示)。检测数据符号是由发射实体 110 发送的数据符号的估计。下面对发射和接收实体处的空间处理进行描述。

这里描述的空间滤波器矩阵计算技术可以用于单载波 MIMO 系统以及多载波 MIMO 系统。可以用正交频分复用 (OFDM)、离散多音频 (DMT)、其它多载波调制技术或其它结构来获取多载波。OFDM 有效地将全部系统带宽分成多个 ( $N_F$ ) 正交的子带,其也被称为音频、子载波、频率段和频率信道。利用 OFDM,每个子带与可用数据进行调制的相应子载波相关联。

在 MIMO 系统 100 中,由发射实体 110 处的  $N_T$  个发射天线和接收实体 150 处的  $N_R$  个接收天线形成的 MIMO 信道可以用一个  $N_R \times N_T$  信道响应矩阵  $\mathbf{H}(m)$  来表征,其可以表示为:

$$\mathbf{H}(m) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(m) & h_{1,2}(m) & \cdots & h_{1,N_T}(m) \\ h_{2,1}(m) & h_{2,2}(m) & \cdots & h_{2,N_T}(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1}(m) & h_{N_R,2}(m) & \cdots & h_{N_R,N_T}(m) \end{bmatrix}, \quad \text{公式(1)}$$

其中,项  $h_{i,j}(m)$  表示用于传输跨度  $m$  的发射天线  $j$  与接收天线  $i$  之间的耦合或复信道增益,  $i = 1 \dots N_R$ ,  $j = 1 \dots N_T$ 。传输跨度可以涵盖时间和/或频率维度。例如,对于单载波 MIMO 系统,传输跨度可以对应于一个符号周期,其是传输一个数据符号的时间间隔。对于多载波 MIMO 系统,传输跨度可以对应于一个符号周期中的一个子带。传输跨度也可以涵盖多个符号周期和/或多个子带。为了简单起见,假设 MIMO 信道是满秩的,其具有  $N_S = N_T \leq N_R$ 。

MIMO 系统可以支持采用一种或多种工作模式 (例如,“校准”模式以及“非校准”模式) 的数据传输。校准模式可以采用全 CSI

传输，以便数据在 MIMO 信道的正交空间信道（或“本征模式”）上进行传输。非校准模式可以采用部分 CSI 传输，以便数据在 MIMO 信道的空间信道上进行传输，例如从单个发射天线进行发射。

MIMO 系统也可以采用导引发射分集（STD）来提高性能。采用 STD，发射实体使用导引矩阵执行空间处理，以便数据传输观测到全部有效信道，且不会在单个差的信道实现上受阻而停留一延长的时间段。因此，性能不会受制于最差的信道状况。

### 1. 校准模式 - 全 CSI 传输

对于全 CSI 传输，可对  $\mathbf{H}(m)$  的相关矩阵进行本征值分解，以获得  $\mathbf{H}(m)$  的  $N_S$  个本征模式，如下：

$$\mathbf{R}(m) = \mathbf{H}^H(m) \cdot \mathbf{H}(m) = \mathbf{E}(m) \cdot \mathbf{\Lambda}(m) \cdot \mathbf{E}^H(m), \quad \text{公式(2)}$$

其中， $\mathbf{R}(m)$  是  $\mathbf{H}(m)$  的一个  $N_T \times N_T$  相关矩阵；

$\mathbf{E}(m)$  是一个  $N_T \times N_T$  酉矩阵，其各列是  $\mathbf{R}(m)$  的本征向量；

$\mathbf{\Lambda}(m)$  是  $\mathbf{R}(m)$  的本征值构成的一个  $N_T \times N_T$  对角矩阵；以及  
“ $H$ ” 表示共轭转置。

酉矩阵  $\mathbf{U}$  通过性质  $\mathbf{U}^H \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}$  来表征，其中  $\mathbf{I}$  是单位矩阵。酉矩阵的各列互相正交，并且每一列都具有单位功率。矩阵  $\mathbf{E}(m)$  可由发射实体进行空间处理，从而在  $\mathbf{H}(m)$  的  $N_S$  个本征模式上发射数据。本征模式可被视为是通过分解获得的正交空间信道。 $\mathbf{\Lambda}(m)$  的对角项是  $\mathbf{R}(m)$  的本征值，代表  $N_S$  个本征模式的功率增益。还可进行奇异值分解，以获得可用于全 CSI 传输的左和右本征向量的矩阵。

发射实体使用导引发射分集对全 CSI 传输进行空间处理，如下：

$$\mathbf{x}_f(m) = \mathbf{E}(m) \cdot \mathbf{V}(m) \cdot \mathbf{s}(m), \quad \text{公式(3)}$$

其中， $\mathbf{s}(m)$  是一个  $N_T \times 1$  向量，其至多具有将在传输跨度  $m$  中发送的  $N_S$  个数据符号；

$\mathbf{V}(m)$  是用于传输跨度  $m$  的  $N_T \times N_T$  导引矩阵；

$\mathbf{E}(m)$  是用于传输跨度  $m$  的本征向量的矩阵；以及

$\mathbf{x}_f(m)$  是一个  $N_T \times 1$  向量，其具有将在传输跨度  $m$  中从  $N_T$  个发

射天线发送的  $N_T$  个发射符号。

如公式 (3) 所示,  $\underline{\mathbf{s}}(m)$  中的各数据符号由  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  的相应列进行有效地空间扩展。如果  $N_S < N_T$ , 那么用  $N_S \times N_S$  矩阵  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  对  $\underline{\mathbf{s}}(m)$  中的  $N_S$  个数据符号进行空间扩展, 从而获得  $N_S$  个“扩展”符号。各扩展符号包括  $N_S$  个数据符号中的每一个数据符号的一部分。然后将空间扩展的  $N_S$  个扩展符号发送到  $\underline{\mathbf{H}}(m)$  的  $N_S$  个本征模式上。各导引矩阵  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  是酉矩阵, 且可以根据如下所述来生成。

接收实体获取来自  $N_R$  个接收天线的接收符号, 可将其表示为:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{r}}_f(m) &= \underline{\mathbf{H}}(m) \cdot \underline{\mathbf{x}}_f(m) + \underline{\mathbf{n}}(m) = \underline{\mathbf{H}}(m) \cdot \underline{\mathbf{E}}(m) \cdot \underline{\mathbf{V}}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m) + \underline{\mathbf{n}}(m), \\ &= \underline{\mathbf{H}}_{f\_eff}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m) + \underline{\mathbf{n}}(m) \end{aligned} \quad \text{公式(4)}$$

其中,  $\underline{\mathbf{r}}_f(m)$  是一个  $N_R \times 1$  向量, 其具有在传输跨度  $m$  中经由  $N_R$  个接收天线获得的  $N_R$  个接收符号;

$\underline{\mathbf{n}}(m)$  是用于传输跨度  $m$  的噪声向量;

$\underline{\mathbf{H}}_{f\_eff}(m)$  是由数据向量  $\underline{\mathbf{s}}(m)$  使用导引发射分集针对全 CSI 传输所观测到的  $N_R \times N_T$  “有效” MIMO 信道响应矩阵, 其是:

$$\underline{\mathbf{H}}_{f\_eff}(m) = \underline{\mathbf{H}}(m) \cdot \underline{\mathbf{E}}(m) \cdot \underline{\mathbf{V}}(m)。 \quad \text{公式(5)}$$

为了简单起见, 假定噪声是加性高斯白噪声 (AWGN), 其具有零均值向量和协方差矩阵  $\underline{\boldsymbol{\varphi}}_{nn} = \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}$ , 其中  $\sigma^2$  是噪声方差以及  $\underline{\mathbf{I}}$  是单位矩阵。

接收实体能够使用各种接收机处理技术来恢复  $\underline{\mathbf{s}}(m)$  中的数据符号。适用于全 CSI 传输的技术包括全 CSI 技术和最小均方误差 (MMSE) 技术。

对于全 CSI 技术, 接收实体可以导出空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{fcsi}(m)$ , 如下:

$$\underline{\mathbf{M}}_{fcsi}(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\boldsymbol{\Lambda}}^{-1}(m) \cdot \underline{\mathbf{E}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}^H(m)。 \quad \text{公式(6)}$$

接收实体可以使用  $\underline{\mathbf{M}}_{fcsi}(m)$  执行接收机空间处理, 如下:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{\mathbf{s}}}_{fcsi}(m) &= \underline{\mathbf{M}}_{fcsi}(m) \cdot \underline{\mathbf{r}}_f(m), \\ &= \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\boldsymbol{\Lambda}}^{-1}(m) \cdot \underline{\mathbf{E}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}^H(m) \cdot [\underline{\mathbf{H}}(m) \cdot \underline{\mathbf{E}}(m) \cdot \underline{\mathbf{V}}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m) + \underline{\mathbf{n}}(m)], \\ &= \underline{\mathbf{s}}(m) + \underline{\mathbf{n}}_f(m), \end{aligned}$$

公式(7)

其中， $\hat{\mathbf{s}}_{fcsi}(m)$ 是具有  $N_S$  个检测数据符号的  $N_T \times 1$  向量；以及

$\mathbf{n}_f(m)$ 是在接收机空间处理后的后检测噪声；

对于 MMSE 技术，接收实体可以导出空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{f\_mmse}(m)$ ，如下：

$$\mathbf{M}_{f\_mmse}(m) = [\mathbf{H}_{f\_eff}^H(m) \cdot \mathbf{H}_{f\_eff}(m) + \sigma^2 \cdot \mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{H}_{f\_eff}^H(m)。 \quad \text{公式(8)}$$

空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{f\_mmse}(m)$ 将来自空间滤波器的符号估计和  $\mathbf{s}(m)$  中的数据符号之间的均方误差最小化。

接收实体可以执行 MMSE 空间处理，如下：

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_{f\_mmse}(m) &= \mathbf{D}_{f\_mmse}^{-1}(m) \cdot \mathbf{M}_{f\_mmse}(m) \cdot \mathbf{r}_f(m), \\ &= \mathbf{D}_{f\_mmse}^{-1}(m) \cdot \mathbf{M}_{f\_mmse}(m) \cdot [\mathbf{H}_{f\_eff}(m) \cdot \mathbf{s}(m) + \mathbf{n}(m)], \quad \text{公式(9)} \\ &= \mathbf{D}_{f\_mmse}^{-1}(m) \cdot \mathbf{M}_{f\_mmse}(m) \cdot \mathbf{H}_{f\_eff}(m) \cdot \mathbf{s}(m) + \mathbf{n}_{f\_mmse}(m), \end{aligned}$$

其中， $\mathbf{D}_{f\_mmse}(m)$ 是包括  $\mathbf{M}_{f\_mmse}(m) \cdot \mathbf{H}_{f\_eff}(m)$  的对角元素的对角矩阵，

或者， $\mathbf{D}_{f\_mmse}(m) = \text{diag}[\mathbf{M}_{f\_mmse}(m) \cdot \mathbf{H}_{f\_eff}(m)]$ ；以及

$\mathbf{n}_{f\_mmse}(m)$ 是 MMSE 滤波噪声。

来自空间滤波器  $\mathbf{M}_{f\_mmse}(m)$ 的符号估计是数据符号的非归一化的估计。与缩放矩阵  $\mathbf{D}_{f\_mmse}(m)$ 相乘提供了数据符号的归一化的估计。

全 CSI 传输试图在  $\mathbf{H}(m)$  的本征模式上发送数据。然而，全 CSI 数据传输可能不完全正交，由于例如，有缺陷的  $\mathbf{H}(m)$  的估计，本征值分解中的误差，有限的算术精确度等。MMSE 技术可解决（或“清除”）全 CSI 数据传输中的任何正交性丢失。

表 1 总结了在发射和接收实体处使用导引发射分集针对全 CSI 传输的空间处理。

表 1

| 实体  | 校准模式 - 全 CSI 传输  |      |
|-----|--|------|
| 发射机 | $\mathbf{x}_f(m) = \mathbf{E}(m) \cdot \mathbf{V}(m) \cdot \mathbf{s}(m)$        | 空间处理 |
|     | $\mathbf{H}_{f\_eff}(m) = \mathbf{H}(m) \cdot \mathbf{E}(m) \cdot \mathbf{V}(m)$ | 有效信  |

|              |  |                 |
|--------------|--|-----------------|
|              |  | 道               |
| 接收机<br>全 CSI | $\underline{\mathbf{M}}_{f_{csi}}(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{\Lambda}}^{-1}(m) \cdot \underline{\mathbf{E}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}^H(m)$   | 空间滤波<br>器矩阵     |
|              | $\hat{\underline{\mathbf{s}}}_{f_{csi}}(m) = \underline{\mathbf{M}}_{f_{csi}}(m) \cdot \underline{\mathbf{r}}_f(m)$  | 空间处<br>理        |
| 接收机<br>MMSE  | $\underline{\mathbf{M}}_{f\_mmse}(m) = [\underline{\mathbf{H}}_{f\_eff}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{f\_eff}(m) + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}_{f\_eff}^H(m)$<br>$\underline{\mathbf{D}}_{f\_mmse}(m) = \text{diag}[\underline{\mathbf{M}}_{f\_mmse}(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{f\_eff}(m)]$ | 空间滤<br>波器矩<br>阵 |
|              | $\hat{\underline{\mathbf{s}}}_{f\_mmse}(m) = \underline{\mathbf{D}}_{f\_mmse}^{-1}(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{f\_mmse}(m) \cdot \underline{\mathbf{r}}_f(m)$   | 空间处<br>理        |

## 2. 非校准模式 - 部分 CSI 传输

对于使用导引发射分集的部分 CSI 传输，发射实体执行空间处理，如下：

$$\underline{\mathbf{x}}_p(m) = \underline{\mathbf{V}}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m), \quad \text{公式 (10)}$$

其中， $\underline{\mathbf{x}}_p(m)$  是用于传输跨度  $m$  的发射数据向量。如公式 (10) 所示， $\underline{\mathbf{s}}(m)$  中的各数据符号由  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  的相应列进行空间扩展。然后，从  $N_T$  个发射天线发射与  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  相乘所产生的  $N_T$  个扩展符号。

接收实体获得接收符号，可将其表示为：

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{r}}_p(m) &= \underline{\mathbf{H}}(m) \cdot \underline{\mathbf{x}}_p(m) + \underline{\mathbf{n}}(m) = \underline{\mathbf{H}}(m) \cdot \underline{\mathbf{V}}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m) + \underline{\mathbf{n}}(m), \\ &= \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m) + \underline{\mathbf{n}}(m), \end{aligned} \quad \text{公式 (11)}$$

其中， $\underline{\mathbf{r}}_p(m)$  是用于传输跨度  $m$  的接收符号向量；以及

$\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m)$  是由  $\underline{\mathbf{s}}(m)$  使用导引发射分集对部分 CSI 传输观测到的  $N_R \times N_T$  有效 MIMO 信道响应矩阵，其是：

$$\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m) = \underline{\mathbf{H}}(m) \cdot \underline{\mathbf{V}}(m). \quad \text{公式 (12)}$$

接收实体能够使用各种接收机处理技术来恢复  $\underline{\mathbf{s}}(m)$  中的数据符号。适用于部分 CSI 传输的技术包括信道相关矩阵求逆 (CCMI) 技术 (其通常也称为迫零技术)、MMSE 技术以及串行干扰抵消 (SIC) 技术。

对于 CCMI 技术，接收实体可以导出空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(m)$ ，如下：

$$\underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(m) = [\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m)]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m) = \underline{\mathbf{R}}_{p\_eff}^{-1}(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m)。 \quad \text{公式(13)}$$

接收实体可以执行 CCMI 空间处理，如下：

$$\begin{aligned} \hat{\underline{\mathbf{s}}}_{ccmi}(m) &= \underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(m) \cdot \underline{\mathbf{r}}_p(m), \\ &= \underline{\mathbf{R}}_{p\_eff}^{-1}(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m) \cdot [\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m) + \underline{\mathbf{n}}(m)], \\ &= \underline{\mathbf{s}}(m) + \underline{\mathbf{n}}_{ccmi}(m), \end{aligned} \quad \text{公式(14)}$$

其中， $\underline{\mathbf{n}}_{ccmi}(m)$  是 CCMI 滤波噪声。由于  $\underline{\mathbf{R}}_{p\_eff}(m)$  的结构，CCMI 技术可能会放大噪声。

对于 MMSE 技术，接收实体可以导出空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m)$ ，如下：

$$\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) = [\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m) + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m)。 \quad \text{公式(15)}$$

用于部分 CSI 传输的公式 (15) 具有与用于全 CSI 传输的公式 (8) 相同的形式。但是，在用于部分 CSI 传输的公式 (15) 中使用  $\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m)$  (代替  $\underline{\mathbf{H}}_{f\_eff}(m)$ )。

接收实体可以执行 MMSE 空间处理，如下：

$$\begin{aligned} \hat{\underline{\mathbf{s}}}_{p\_mmse}(m) &= \underline{\mathbf{D}}_{p\_mmse}^{-1}(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) \cdot \underline{\mathbf{r}}_p(m), \\ &= \underline{\mathbf{D}}_{p\_mmse}^{-1}(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m) + \underline{\mathbf{n}}_{p\_mmse}(m), \end{aligned} \quad \text{公式(16)}$$

其中， $\underline{\mathbf{D}}_{p\_mmse}(m) = \text{diag}[\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m)]$  以及  $\underline{\mathbf{n}}_{p\_mmse}(m)$  是用于部分 CSI 传输的 MMSE 滤波噪声。

对于 SCI 技术，发射实体在连续阶段中恢复  $\underline{\mathbf{s}}(m)$  中的数据符号。为了清楚起见，下面的描述假设  $\underline{\mathbf{s}}(m)$  的各元素和  $\underline{\mathbf{r}}_p(m)$  的各元素对应于一个数据符号流。接收实体在  $N_S$  个连续阶段中处理  $\underline{\mathbf{r}}_p(m)$  中的  $N_R$  个接收符号流，从而恢复  $\underline{\mathbf{s}}(m)$  中的  $N_S$  个数据符号流。通常，SIC 处理使得针对一个流恢复一个分组，然后针对另一流恢复另一分组，等等。为了简单起见，以下描述假设  $N_S = N_T$ 。

在各阶段  $\ell$ ，其中  $\ell = 1 \dots N_S$ ，接收实体针对该阶段而对  $N_R$  个输入

符号流  $\mathbf{r}_p^\ell(m)$  进行接收机空间处理。用于第一阶段 ( $\ell=1$ ) 的输入符号流是接收符号流, 或者  $\mathbf{r}_p^1(m) = \mathbf{r}_p(m)$ 。用于各后继阶段 ( $\ell=2 \dots N_S$ ) 的输入符号流是在前阶段的修改符号流。用于阶段  $\ell$  的接收机空间处理是基于空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_x^\ell(m)$  的, 其可以基于约化有效信道响应矩阵  $\mathbf{H}_{p\_eff}^\ell(m)$  并进一步根据 CCMI、MMSE 或其它技术而导出的。 $\mathbf{H}_{p\_eff}^\ell(m)$  包括与还未在阶段  $\ell$  中恢复的  $N_S - \ell + 1$  个数据符号流相对应的  $\mathbf{H}_{p\_eff}(m)$  中的  $N_S - \ell + 1$  个列。接收实体针对阶段  $\ell$  获得一个检测数据符号流  $\{\hat{s}_\ell\}$ , 并进一步处理 (例如, 解调、解交织和解码) 该流, 从而获得相应的解码数据流  $\{\hat{d}_\ell\}$ 。

接收实体接下来估计数据符号流  $\{s_\ell\}$  导致其它数据符号流仍未恢复的干扰。为了估计该干扰, 接收实体用发射实体针对该流执行的相同的方式处理 (例如, 重新编码、交织和符号映射) 解码数据流  $\{\hat{d}_\ell\}$ , 并获得“重新调制的”符号流  $\{\tilde{s}_\ell\}$ , 其是刚恢复的数据符号流  $\{s_\ell\}$  的估计。然后, 接收实体使用导引矩阵  $\mathbf{V}(m)$  对该重新调制的符号流进行空间处理, 并进一步将结果与信道响应矩阵  $\mathbf{H}(m)$  相乘, 从而获得由流  $\{s_\ell\}$  导致的  $N_R$  个干扰分量  $\mathbf{i}^\ell(m)$ 。然后, 接收实体从用于当前阶段  $\ell$  的  $N_R$  个输入符号流  $\mathbf{r}_p^\ell(m)$  中减去  $N_R$  个干扰分量  $\mathbf{i}^\ell(m)$ , 从而获得用于下一个阶段的  $N_R$  个输入符号流  $\mathbf{r}_p^{\ell+1}(m)$ , 或者  $\mathbf{r}_p^{\ell+1}(m) = \mathbf{r}_p^\ell(m) - \mathbf{i}^\ell(m)$ 。输入符号流  $\mathbf{r}_p^{\ell+1}(m)$  表示若未发射数据符号流  $\{s_\ell\}$  而接收实体将收到的流, 假设有效地执行了干扰抵消。然后, 接收实体对  $N_R$  个输入符号流  $\mathbf{r}_p^{\ell+1}(m)$  重复相同的处理, 以恢复另一数据流。然而, 用于后继阶段  $\ell+1$  的有效信道响应矩阵  $\mathbf{H}_{p\_eff}^{\ell+1}(m)$  被减去了与在阶段  $\ell$  中恢复的数据符号流  $\{s_\ell\}$  相对应的一列。

对于 SIC 技术, 各数据符号流的 SNR 依赖于: (1) 用于各阶段

的接收机处理技术（如，CCMI 或 MMSE），（2）恢复数据符号流的特定阶段，以及（3）干扰量，由于在后面阶段中恢复数据符号流。通常，SNR 逐步地改进在后面阶段中恢复的数据符号流，因为取消了在先前阶段中恢复的数据符号流的干扰。然后这可以将更高的速率用于在后面阶段中恢复的数据符号流。

表 2 总结了在发射和接收实体处使用导引发射分集针对部分 CSI 传输的空间处理。为了简单起见，在表 2 中未示出 SIC 技术。

表 2

| 实体          | 非校准模式 - 部分 CSI 传输   |         |
|-------------|---|---------|
| 发射机         | $\underline{\mathbf{x}}_p(m) = \underline{\mathbf{V}}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m)$   | 空间处理    |
|             | $\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m) = \underline{\mathbf{H}}(m) \cdot \underline{\mathbf{V}}(m)$  | 有效信道    |
| 接收机<br>CCMI | $\underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(m) = [\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m)]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m)$  | 空间滤波器矩阵 |
|             | $\hat{\underline{\mathbf{s}}}_{ccmi}(m) = \underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(m) \cdot \underline{\mathbf{r}}_p(m)$   | 空间处理    |
| 接收机<br>MMSE | $\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) = [\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m) + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m)$ | 空间滤波器矩阵 |
|             | $\underline{\mathbf{D}}_{p\_mmse}(m) = \text{diag}[\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m)]$   | 空间滤波器矩阵 |
|             | $\hat{\underline{\mathbf{s}}}_{p\_mmse}(m) = \underline{\mathbf{D}}_{p\_mmse}^{-1}(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) \cdot \underline{\mathbf{r}}_p(m)$  | 空间处理    |

图 2 示出了使用导引发射分集用于数据传输的模型。发射实体 110 针对导引发射分集进行空间处理（或空间扩展）（框 220），以及针对全 CSI 或部分 CSI 传输进行空间处理（框 230）。接收实体 150 针对全 CSI 或部分 CSI 传输进行接收机空间处理（框 260），以及针对导引发射分集进行接收机空间处理（或空间解扩）（框 270）。如图 2 所示，在针对全 CSI 和部分 CSI 传输进行空间处理之前（如果有的话），发射实体针对导引发射分集进行空间扩展。在对导引发射分集进行空间解扩之前，接收实体可以针对全 CSI 或部分 CSI 传输进行互补性的接收机空间处理。

### 3. 空间滤波器矩阵计算

利用导引发射分集,不同的导引矩阵 $\underline{\mathbf{V}}(m)$ 可以用于不同的传输跨度,从而使数据传输观测到的有效 MIMO 信道得以随机化。然后这可以改进性能,因为数据传输不会在一延长的时间段内观测到“差的”MIMO 信道实现。传输跨度可以对应于用于单载波 MIMO 系统的符号周期或用于多载波 MIMO 系统的子带。

图 3A 示出了针对单载波 MIMO 系统使用导引发射分集的部分 CSI 传输。对于该系统,传输跨度指标 $m$ 可以等于符号周期指标 $n$ (或者 $m=n$ )。可以在各符号周期 $n$ 中将数据符号的一个向量 $\underline{\mathbf{s}}(n)$ 进行发射,并使用针对该符号周期所选择的导引矩阵 $\underline{\mathbf{V}}(n)$ 对 $\underline{\mathbf{s}}(n)$ 进行空间扩展。各数据符号向量 $\underline{\mathbf{s}}(n)$ 观测到 $\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(n) = \underline{\mathbf{H}}(n) \cdot \underline{\mathbf{V}}(n)$ 的有效 MIMO 信道响应,并使用空间滤波器矩阵 $\underline{\mathbf{M}}_x(n)$ 恢复 $\underline{\mathbf{s}}(n)$ 。

图 3B 示出了在多载波 MIMO 系统中使用导引发射分集的部分 CSI 传输。对于该系统,传输跨度指标 $m$ 可以等于子带指标 $k$ (或者 $m=k$ )。对于各符号周期,可以在各子带 $k$ 中发射数据符号的一个向量 $\underline{\mathbf{s}}(k)$ ,并使用针对该子带选择的导引矩阵 $\underline{\mathbf{V}}(k)$ 将 $\underline{\mathbf{s}}(k)$ 进行空间扩展。各数据符号向量 $\underline{\mathbf{s}}(k)$ 观测到 $\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(k) = \underline{\mathbf{H}}(k) \cdot \underline{\mathbf{V}}(k)$ 的有效 MIMO 信道响应,并使用空间滤波器矩阵 $\underline{\mathbf{M}}_x(k)$ 将 $\underline{\mathbf{s}}(k)$ 恢复。向量 $\underline{\mathbf{s}}(k)$ 和矩阵 $\underline{\mathbf{V}}(k)$ 、 $\underline{\mathbf{H}}(k)$ 以及 $\underline{\mathbf{M}}_x(k)$ 也是符号周期 $n$ 的函数,但为了简单起见并未将其示出。

如图 3A 和 3B 所示,如果不同的导引矩阵用于不同的传输跨度,则由接收实体使用的空间滤波器矩阵是传输跨度指标 $m$ 的函数。即使信道响应矩阵 $\underline{\mathbf{H}}(m)$ 在一系列传输跨度内是固定的或不变的,这也是正确的。例如,在多载波 MIMO 系统中,对于具有平坦频率响应的平坦衰落 MIMO 信道, $\underline{\mathbf{H}}(k)$ 可以在子带组上是固定的。又如,在单载波 MIMO 系统中,对于不具有时间衰落的 MIMO 信道, $\underline{\mathbf{H}}(n)$ 可以在给定的时间间隔内是固定的。该时间间隔可以对应于用于发射数据符号块的全部或部分持续时间,该数据符号块以块的形式进行编码和解码。

相关度通常存在于用于相邻传输跨度的信道响应矩阵之间,例如在 $\underline{\mathbf{H}}(m)$ 和 $\underline{\mathbf{H}}(m \pm 1)$ 之间。该相关可以用于简化在接收实体处用于空间

滤波器矩阵的计算。下面针对两种情况 - 全相关和部分相关 - 的计算进行描述。

### A. 全相关

利用全相关，用于 MIMO 信道的信道响应矩阵在一系列相关的传输跨度索引内是固定的，例如， $m=1\dots M$ ，其中  $M$  可以是大于 1 的任何整数值。因此， $\mathbf{H}(1) = \mathbf{H}(2) = \dots = \mathbf{H}(M) = \mathbf{H}$ 。

对于全 CSI 技术，可以将使用全相关信道响应矩阵的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{fcsi}(m)$  表示为：

$$\mathbf{M}_{fcsi}(m) = \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{\Lambda}^{-1}(m) \cdot \mathbf{E}^H(m) \cdot \mathbf{H}^H \quad \text{公式 (17)}$$

然后可以将空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{fcsi}(m)$  计算为：

$$\mathbf{M}_{fcsi}(m) = \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{M}_{fcsi\_base}, \text{ 其中 } m=1\dots M, \quad \text{公式 (18)}$$

其中， $\mathbf{M}_{fcsi\_base} = \mathbf{\Lambda}^{-1} \cdot \mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H$  是基本空间滤波器矩阵，即在不使用导引发射分集的情况下用于全 CSI 技术的空间滤波器矩阵。基本空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{fcsi\_base}$  不是传输跨度  $m$  的函数，因为信道响应矩阵  $\mathbf{H}$  是固定的。公式 (18) 表示用于各传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{fcsi}(m)$  可以通过将基本空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{fcsi\_base}$  预先乘以用于该传输跨度的导引矩阵  $\mathbf{V}^H(m)$  来获取。

或者，也可以将空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{fcsi}(m)$  计算为：

$$\mathbf{M}_{fcsi}(m) = \mathbf{W}_1(m) \cdot \mathbf{M}_{fcsi}(1), \text{ 其中 } m=2\dots M, \quad \text{公式 (19)}$$

其中， $\mathbf{M}_{fcsi}(1) = \mathbf{V}^H(1) \cdot \mathbf{\Lambda}^{-1} \cdot \mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H$  以及  $\mathbf{W}_1(m) = \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{V}(1)$ 。公式 (19) 表示用于各传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{fcsi}(m)$  可以通过将用于传输跨度 1 的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{fcsi}(1)$  预先乘以矩阵  $\mathbf{W}_1(m)$  来获取。矩阵  $\mathbf{W}_1(m)$  是酉矩阵，其中  $m=2\dots M$ ，每个酉矩阵是通过乘以两个酉导引矩阵  $\mathbf{V}(m)$  和  $\mathbf{V}(1)$  来获取的。可以将矩阵  $\mathbf{W}_1(m)$  预先计算并存储在存储器中。

对于用于全 CSI 传输的 MMSE 技术，可以将使用全相关信道响应矩阵的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{f\_mmse}(m)$  表示为：

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_{f\_mmse}(m) &= [\mathbf{H}_{f\_eff}^H(m) \cdot \mathbf{H}_{f\_eff}(m) + \sigma^2 \cdot \mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{H}_{f\_eff}^H(m), \\
&= [\mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{V}(m) + \sigma^2 \cdot \mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H, \text{公式 (20)} \\
&= \mathbf{V}^H(m) \cdot [\mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} + \sigma^2 \cdot \mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H
\end{aligned}$$

公式 (20) 是使用性质  $(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})^{-1} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{A}^{-1}$  和  $\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}^H = \mathbf{I}$  导出的。可以将公式 (20) 中第二个等式中的括弧内的项表示为：

$$\begin{aligned}
[\mathbf{V}^H \cdot \mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{V} + \sigma^2 \cdot \mathbf{I}] &= [\mathbf{V}^H (\mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} + \sigma^2 \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}^H) \cdot \mathbf{V}], \\
&= [\mathbf{V}^H (\mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} + \sigma^2 \cdot \mathbf{I}) \cdot \mathbf{V}],
\end{aligned}$$

其中，为了清楚起见省略了“(m)”。然后，可以将上面第二个等式中的项的逆表示为：

$$[\mathbf{V}^H (\mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} + \sigma^2 \cdot \mathbf{I}) \cdot \mathbf{V}]^{-1} = [\mathbf{V}^H (\mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} + \sigma^2 \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \mathbf{V}],$$

其中， $\mathbf{V}^H = \mathbf{V}^{-1}$ 。

可以将空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{f\_mmse}(m)$  计算为：

$$\mathbf{M}_{f\_mmse}(m) = \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{M}_{f\_mmse\_base}, \text{其中 } m=1\dots M, \text{公式 (21)}$$

其中， $\mathbf{M}_{f\_mmse\_base} = [\mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} + \sigma^2 \cdot \mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H$ 。与全 CSI 技术类似，用于传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{f\_mmse}(m)$  可以通过将基本空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{f\_mmse\_base}(m)$  预先乘以导引矩阵  $\mathbf{V}^H(m)$  来获取。也可以将空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{f\_mmse}(m)$  计算为：

$$\mathbf{M}_{f\_mmse}(m) = \mathbf{W}_1(m) \cdot \mathbf{M}_{f\_mmse}(1), \text{其中 } m=2\dots M, \text{公式 (22)}$$

其中， $\mathbf{M}_{f\_mmse}(1) = \mathbf{V}^H(1) \cdot [\mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E} + \sigma^2 \cdot \mathbf{I}]^{-1} \cdot \mathbf{E}^H \cdot \mathbf{H}^H$ 。

对于 CCMI 技术，可以将使用全相关信道响应矩阵的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{ccmi}(m)$  表示为：

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_{ccmi}(m) &= [\mathbf{H}_{p\_eff}^H(m) \cdot \mathbf{H}_{p\_eff}(m)]^{-1} \cdot \mathbf{H}_{p\_eff}^H(m), \\
&= [\mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{V}(m)]^{-1} \cdot \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{H}^H, \\
&= [\mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{V}(m)]^{-1} \cdot \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{H}^H, \text{公式 (23)} \\
&= \mathbf{V}^{-1}(m) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot [\mathbf{V}^H(m)]^{-1} \cdot \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{H}^H, \\
&= \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{H}^H,
\end{aligned}$$

其中， $[\mathbf{V}^H(m)]^{-1} = \mathbf{V}(m)$ ，因为  $\mathbf{V}(m)$  是酉矩阵。

因此，可以将空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{ccmi}(m)$  计算为：

$$\underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{ccmi\_base}, \text{ 其中 } m=1\dots M, \quad \text{公式(24)}$$

其中,  $\underline{\mathbf{M}}_{ccmi\_base} = \underline{\mathbf{R}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}^H$ 。也可以将空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(m)$  计算为:

$$\underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(m) = \underline{\mathbf{W}}_1(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(1), \text{ 其中 } m=2\dots M, \quad \text{公式(25)}$$

其中,  $\underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(1) = \underline{\mathbf{V}}^H(1) \cdot \underline{\mathbf{R}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}^H$ 。

对于用于部分 CSI 传输的 MMSE 技术, 可以将使用全相关信道响应矩阵的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m)$  表示为:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) &= [\underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}(m) + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}_{p\_eff}^H(m), \\ &= [\underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}^H \cdot \underline{\mathbf{H}} \cdot \underline{\mathbf{V}}(m) + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{H}}^H, \\ &= \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot [\underline{\mathbf{H}}^H \cdot \underline{\mathbf{H}} + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}^H \end{aligned} \quad \text{公式(26)}$$

可以用与以上公式 (20) 相似的方式导出公式 (26)。

可以将空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m)$  计算为:

$$\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse\_base}, \text{ 其中 } m=1\dots M, \quad \text{公式(27)}$$

其中,  $\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse\_base} = [\underline{\mathbf{H}}^H \cdot \underline{\mathbf{H}} + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}^H$ 。也可以将空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m)$  计算为:

$$\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) = \underline{\mathbf{W}}_1(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(1), \text{ 其中 } m=2\dots M, \quad \text{公式(28)}$$

其中,  $\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(1) = \underline{\mathbf{V}}^H(1) \cdot [\underline{\mathbf{H}}^H \cdot \underline{\mathbf{H}} + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}^H$ 。

表 3 总结了针对在传输跨度  $m=1\dots M$  中用于使用全相关信道响应矩阵的全 CSI 及部分 CSI 传输的空间滤波器矩阵的计算。

表 3 - 使用全相关的空间滤波器矩阵

| 模式     | 空间滤波器矩阵  | 技术    |
|--------|--|-------|
| 全 CSI  | $\underline{\mathbf{M}}_{fcsi\_base} = \underline{\mathbf{\Lambda}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{E}}^H \cdot \underline{\mathbf{H}}^H$ , 以及<br>$\underline{\mathbf{M}}_{fcsi}(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{fcsi\_base}$   | 全 CSI |
|        | $\underline{\mathbf{M}}_{f\_mmse\_base} = [\underline{\mathbf{E}}^H \cdot \underline{\mathbf{H}}^H \cdot \underline{\mathbf{H}} \cdot \underline{\mathbf{E}} + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{E}}^H \cdot \underline{\mathbf{H}}^H$ , 以<br>及<br>$\underline{\mathbf{M}}_{f\_mmse\_base}(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{f\_mmse\_base}$ | MMSE  |
| 部分 CSI | $\underline{\mathbf{M}}_{ccmi\_base} = \underline{\mathbf{R}}^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}^H$ , 以及<br>$\underline{\mathbf{M}}_{ccmi}(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{ccmi\_base}$  | CCMI  |

|  |   |      |
|--|---|------|
|  | $\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse\_base} = [\underline{\mathbf{H}}^H \cdot \underline{\mathbf{H}} + \sigma^2 \cdot \underline{\mathbf{I}}]^{-1} \cdot \underline{\mathbf{H}}^H$ ， 以及<br>$\underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse}(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{p\_mmse\_base}$ | MMSE |
|--|---|------|

通常，可以将用于传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵计算为  $\underline{\mathbf{M}}_x(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{x\_base}$ ，其中，下标“ $x$ ”表示接收机处理技术，且可以是“ $fcsi$ ”、“ $f\_mmse$ ”、“ $ccmi$ ”或“ $p\_mmse$ ”。如果不使用导引发射分集，也可以计算基本空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}$ 。

图 4 示出了处理器 400 对在传输跨度  $m=1\dots M$  中使用全相关信道响应矩阵的空间滤波器矩阵进行计算的流程图。首先，计算初始空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_init}$ （框 412）。该初始空间滤波器矩阵可以是基本空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}$ ，其基于如下导出：(1) 信道响应矩阵  $\underline{\mathbf{H}}$ ；以及(2) 所选择使用的接收机处理技术（例如，全 CSI、用于全 CSI 的 MMSE、CCMI 或用于部分 CSI 的 MMSE）。当然，初始空间滤波器矩阵也可以是用于传输跨度  $m=1$  的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(1)$ ，其可以基于  $\underline{\mathbf{H}}$  和  $\underline{\mathbf{V}}(1)$  导出。

然后，如果  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_init} = \underline{\mathbf{M}}_{x\_base}$ ，则将传输跨度指标  $m$  设为 1（如图 4 所示），或者，如果  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_init} = \underline{\mathbf{M}}_x(1)$ ，则将其设为 2（框 414）。然后，基于初始空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_init}$  和用于传输跨度  $m$  的导引矩阵  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  计算用于传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(m)$ （框 416）。具体而言，可以基于  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}$  和  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  或  $\underline{\mathbf{M}}_x(1)$  和  $\underline{\mathbf{V}}_1(m)$  计算  $\underline{\mathbf{M}}_x(m)$ ，如上所述。然后判断是否  $m < M$ （框 420）。如果答案是“是”，那么增加指标  $m$ （框 422），并且过程返回到框 416，以计算用于另一传输跨度的空间滤波器矩阵。否则，如果在框 420 中  $m = M$ ，那么空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(1)$  至  $\underline{\mathbf{M}}_x(m)$  分别用于接收符号向量  $\underline{\mathbf{r}}_x(1)$  至  $\underline{\mathbf{r}}_x(M)$  的接收机空间处理（框 424）。虽然为了简单起见未示于图 4 中，但是一旦生成空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(m)$  并获得接收符号向量  $\underline{\mathbf{r}}_x(m)$ ，则各空间滤波器矩阵就可以用于接收机空间处理。

对于全 CSI 传输，也可以将发射实体处的空间处理简化为： $\underline{\mathbf{x}}_f(m) = \underline{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{V}}(m) \cdot \underline{\mathbf{s}}(m)$ 。可以基于用于各传输跨度  $m$  的导引矩阵  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  和矩阵  $\underline{\mathbf{E}}$  计算用于该传输跨度的矩阵  $\underline{\mathbf{E}} \cdot \underline{\mathbf{V}}(m)$ ， $\underline{\mathbf{E}}$  不是用于全相关情形的传

输跨度的函数。

## B. 部分相关

利用部分相关，用于 MIMO 信道的信道响应矩阵在一系列相关的传输跨度索引内不是全相关。在此情况下，针对传输跨度  $\ell$  所计算的空间滤波器矩阵可以用于帮助计算用于另一传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵。

在一个实施例中，通过剔除用于传输跨度  $\ell$  的导引矩阵  $\underline{\mathbf{V}}(\ell)$ ，而从针对传输跨度  $\ell$  所计算的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(\ell)$  中获得用于传输跨度  $\ell$  的基本空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(\ell)$ ，如下：

$$\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(\ell) = \underline{\mathbf{V}}(\ell) \cdot \underline{\mathbf{M}}_x(\ell) \quad \text{公式(29)}$$

然后，基本空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(\ell)$  用于导出用于传输跨度  $m$ （例如  $m = \ell \pm 1$ ）的基本空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(m)$ 。例如，可以使用重复地对  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(\ell)$  进行一组计算的迭代过程或运算来计算  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(m)$ ，从而获得  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(m)$  的最终方案。在本领域中，用于计算 MMSE 方案的迭代过程（例如，自适应 MMSE 运算、梯度运算、格型运算等）是已知的，因此未在此对其进行描述。可以将用于传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(m)$  计算为：

$$\underline{\mathbf{M}}_x(m) = \underline{\mathbf{V}}^H(m) \cdot \underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(m) \quad \text{公式(30)}$$

因此，可以将该实施例的处理次序给定为： $\underline{\mathbf{M}}_x(\ell) \rightarrow \underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(\ell) \Rightarrow \underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(m) \rightarrow \underline{\mathbf{M}}_x(m)$ ，其中“ $\rightarrow$ ”表示直接计算，以及“ $\Rightarrow$ ”表示可能的迭代计算。基本空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(\ell)$  和  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(m)$  不包括导引矩阵，而空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(\ell)$  和  $\underline{\mathbf{M}}_x(m)$  分别包括用于传输跨度  $\ell$  和  $m$  的导引矩阵  $\underline{\mathbf{V}}(\ell)$  和  $\underline{\mathbf{V}}(m)$ 。

在另一实施例中，使用对初始猜测  $\tilde{\underline{\mathbf{M}}}_x(m)$  重复进行一组计算的迭代过程，来计算用于传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(m)$ 。可以根据针对传输跨度  $\ell$  所导出的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(\ell)$ ，来导出初始猜测，如下：

$$\tilde{\mathbf{M}}_x(m) = \mathbf{W}_\ell(m) \cdot \mathbf{M}_x(\ell), \quad \text{公式(31)}$$

其中,  $\mathbf{W}_\ell(m) = \mathbf{V}^H(m) \cdot \mathbf{V}(\ell)$ 。可以将用于该实施例的处理次序给定为:  $\mathbf{M}_x(\ell) \rightarrow \tilde{\mathbf{M}}_x(m) \Rightarrow \mathbf{M}_x(m)$ 。空间滤波器矩阵  $\tilde{\mathbf{M}}_x(m)$  和  $\mathbf{M}_x(m)$  均包括用于传输跨度  $m$  的导引矩阵  $\mathbf{V}(m)$ 。

对于以上实施例来说, 可以将  $\mathbf{M}_{x\_base}(\ell)$  和  $\tilde{\mathbf{M}}_x(m)$  视为用来导出用于新的传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_x(m)$  的初始空间滤波器矩阵。通常,  $\mathbf{M}_x(\ell)$  和  $\mathbf{M}_x(m)$  之间的相关量依赖于  $\mathbf{M}_{x\_base}(\ell)$  和  $\mathbf{M}_{x\_base}(m)$  之间的相关量, 其依赖于用于传输跨度  $\ell$  和  $m$  的  $\mathbf{H}(\ell)$  和  $\mathbf{H}(m)$  之间的相关量。较高的相关度可以导致较快地收敛到用于  $\mathbf{M}_x(\ell)$  的最终方案。

图 5 示出了针对传输跨度  $m=1\dots M$  而使用部分相关信道响应矩阵的空间滤波器矩阵进行空间滤波器矩阵计算的处理过程 500 的流程图。将用于当前和下一个传输跨度的指标初始化为  $\ell=1$  和  $m=2$  (框 512)。根据所选用的接收机处理技术来计算用于传输跨度  $\ell$  的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_x(\ell)$  (框 514)。然后, 基于空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_x(\ell)$  以及适当的导引矩阵  $\mathbf{V}(\ell)$  和  $\mathbf{V}(m)$ , 来计算用于传输跨度  $m$  的初始空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{x\_ini}$ , 例如在公式 (29) 或 (31) 中所示 (框 516)。然后, 例如使用迭代过程, 基于初始空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_{x\_ini}$  来计算用于传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_x(m)$  (框 518)。

然后判断是否  $m < M$  (框 520)。如果答案是“是”, 则更新指标  $\ell$  和  $m$ , 例如更新成  $\ell = m$  和  $m = m + 1$  (框 522)。然后过程返回到框 516, 以计算用于另一传输跨度的空间滤波器矩阵。否则, 如果已经计算了所有的空间滤波器矩阵, 如在框 520 中所判断, 则将空间滤波器矩阵  $\mathbf{M}_x(1)$  至  $\mathbf{M}_x(M)$  分别用于接收符号向量  $\mathbf{r}_x(1)$  至  $\mathbf{r}_x(M)$  的接收机空间处理 (框 524)。

为了简单起见, 图 5 示出了对用于  $M$  个连续传输跨度  $m=1\dots M$  的  $M$  个空间滤波器矩阵的计算。传输跨度并不需要是邻近的。通常, 所导出的用于一个传输跨度  $\ell$  的空间滤波器矩阵用于获取用于另一传输跨度  $m$  的空间滤波器矩阵的初始猜测, 其中  $\ell$  和  $m$  可以是任何指标值。

#### 4. 导引矩阵

可产生导引矩阵集合（或发射矩阵）并将其用于进行导引发射分集。这些导引矩阵可被表示为 $\{\underline{\mathbf{V}}\}$ ，或 $\underline{\mathbf{V}}(i)$ ， $i=1\dots L$ ，其中 $L$ 是大于1的任意整数值。每个导引矩阵 $\underline{\mathbf{V}}(i)$ 应该是酉矩阵。这一条件保证利用 $\underline{\mathbf{V}}(i)$ 同时发射的 $N_T$ 个数据符号具有相同的功率并且在利用 $\underline{\mathbf{V}}(i)$ 进行空间扩展之后互相正交。

可按照各种方式产生由 $L$ 个导引矩阵组成的集合。例如，可基于酉基本矩阵和一组标量来产生 $L$ 个导引矩阵。基本矩阵可用作 $L$ 个导引矩阵中的一个。其它 $L-1$ 个导引矩阵可通过将基本矩阵的行乘以不同的标量组合来产生。每个标量可以是任何实数或复数值。选择标量具有单位幅值，以便利用这些标量产生的导引矩阵是酉矩阵。

基本矩阵可以是 Walsh 矩阵。一个 $2\times 2$  Walsh 矩阵 $\underline{\mathbf{W}}_{2\times 2}$ 和一个更大尺寸的 Walsh 矩阵 $\underline{\mathbf{W}}_{2N\times 2N}$ 可表示如下：

$$\underline{\mathbf{W}}_{2\times 2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \text{ 和 } \underline{\mathbf{W}}_{2N\times 2N} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{W}}_{N\times N} & \underline{\mathbf{W}}_{N\times N} \\ \underline{\mathbf{W}}_{N\times N} & -\underline{\mathbf{W}}_{N\times N} \end{bmatrix}。 \quad \text{公式(32)}$$

Walsh 矩阵的维度是 2 的幂（如，2、4、8 等）。

基本矩阵也可以是傅立叶矩阵。对于 $N\times N$ 傅立叶矩阵 $\underline{\mathbf{D}}_{N\times N}$ ， $\underline{\mathbf{D}}_{N\times N}$ 的第 $n$ 行第 $m$ 列的元素 $d_{m,n}$ 可以表示为：

$$d_{m,n} = e^{-j2\pi\frac{(n-1)(m-1)}{N}}， \text{ 其中 } n = \{1 \dots N\} \text{ 且 } m = \{1 \dots N\}。 \quad \text{公式(33)}$$

可形成任意平方维度的傅立叶矩阵（如，2，3，4，5 等）。其它矩阵也可用作基本矩阵。

对于 $N\times N$ 基本矩阵来说，可将基本矩阵的行 2 至  $N$  中的每一行独立地乘以  $K$  个不同的可能的标量中的一个。根据用于  $N-1$  行的  $K$  个标量的  $K^{N-1}$  个不同的置换形式，获得  $K^{N-1}$  个不同的导引矩阵。例如，将行 2 至  $N$  的每一行独立地乘以标量+1、-1、+ $j$  或 $-j$ 。对于 $N=4$ 且 $K=4$ ，利用四个不同的标量，可由 $4\times 4$ 基本矩阵生成 64 个不同的导引矩阵。通常，可以将基本矩阵的每一行乘以具有 $e^{j\theta}$ 形式的任意标量，其中 $\theta$ 可为任意相位值。对标量相乘的 $N\times N$ 基本矩阵的每个元素用 $1/\sqrt{N}$ 进一步缩放，以获得每列为单位功率的 $N\times N$ 导引矩阵。

基于 Walsh 矩阵（即  $4 \times 4$  傅立叶矩阵）导出的导引矩阵具有某些预期性质。如果将 Walsh 矩阵的行乘以标量  $\pm 1$  和  $\pm j$ ，则所得导引矩阵的每个元素是  $+1$ 、 $-1$ 、 $+j$  或  $-j$ 。在这种情况下，仅通过位运算，就可以将空间滤波器矩阵的一个元素（即“权重”）与导引矩阵的一个元素相乘。如果  $L$  个导引矩阵的元素属于由  $\{+1, -1, +j, -j\}$  组成的集合，则可以极大地简化用于全相关情况下导出空间滤波器矩阵的计算。

## 5. MIMO 系统

图 6 示出了 MIMO 系统 600 中接入点 610 和用户终端 650 的框图。接入点 610 配备有  $N_{ap}$  个可用于进行数据传输和接收的天线，以及，用户终端配备有  $N_{ut}$  个天线，其中  $N_{ap} > 1$  以及  $N_{ut} > 1$ 。

在下行链路上，在接入点 610 处，TX 数据处理器 620 对业务/分组数据以及控制/开销数据进行接收和处理（编码、交织以及符号映射），并提供数据符号。TX 空间处理器 630 利用导引矩阵  $\underline{V}(m)$  和可能用于下行链路的本征向量矩阵  $\underline{E}(m)$  对该数据符号进行空间处理，例如，如表 1 和 2 所示。TX 空间处理器 630 还适当地采用导频符号进行复用，并将  $N_{ap}$  个发射符号流提供给  $N_{ap}$  个发射机单元 632a 至 632ap。每个发射机单元 632 对相应的发射符号流进行接收和处理，并提供相应的下行链路调制信号。从  $N_{ap}$  个天线 634a 至 634ap 分别发射来自发射机单元 632a 至 632ap 的  $N_{ap}$  个下行链路调制信号。

在用户终端 650 处， $N_{ut}$  个天线 652a 至 652ut 接收所发射的下行链路调制信号，并且各天线向相应的接收机单元 654 提供接收信号。各接收机单元 654 对接收机单元 632 执行的处理进行互补性的处理，并提供接收符号。RX 空间处理器 660 对来自于所有  $N_{ut}$  个接收机单元 654a 至 654ut 的接收符号进行接收机空间处理，例如，如表 1 和 2 所示，并提供检测数据符号。RX 数据处理器 670 对该检测数据符号进行处理（例如，符号解映射、解交织以及解码），并提供用于下行链路的解码数据。

用于上行链路的处理可以与用于下行链路的处理相同或不同。业

务以及控制数据由 TX 数据处理器 688 进行处理（例如，编码、交织以及符号映射）、由 TX 空间处理器 690 利用导引矩阵  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  和可能用于上行链路的本征向量矩阵  $\underline{\mathbf{E}}(m)$  进行空间处理、并利用导频符号进行复用，以产生  $N_{ut}$  个发射符号流。 $N_{ut}$  个发射机单元 654a 至 654ut 对该  $N_{ut}$  个发射符号流进行修整，以生成  $N_{ut}$  个上行链路调制信号，其经由  $N_{ut}$  个天线 652a 至 652ut 进行发射。

在接入点 610 处，上行链路调制信号由  $N_{ap}$  个天线 634a 至 634ap 进行接收并由  $N_{ap}$  个接收机单元 632a 至 632ap 进行处理，以获得用于上行链路的接收符号。RX 空间处理器 644 对这些接收符号进行接收机空间处理，并提供检测数据符号，其进一步由 RX 数据处理器 646 进行处理，以获得用于上行链路的解码数据。

处理器 638 和 678 分别对接入点和用户终端进行信道估计和空间滤波器矩阵计算。控制器 640 和 680 分别在接入点和用户终端处控制各种处理单元的运行。存储器单元 642 和 682 分别存储由控制器 630 和 680 使用的数据及程序代码。

图 7 示出了对用户终端 650 进行信道估计和空间滤波器矩阵计算的处理器 678 的实施例。信道估计器 712 获取接收导频符号，并导出用于各传输跨度的信道响应矩阵，在各传输跨度中接收导频符号是可用的。滤波器 714 可以对用于当前和先前的传输跨度的信道响应矩阵进行时域滤波，以获得较高质量的信道响应矩阵  $\underline{\mathbf{H}}(m)$ 。然后单元 716 计算初始空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_init}$ 。

对于全相关  $\underline{\mathbf{H}}(m)$ ，初始空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_init}$  可以是：（1）基于  $\underline{\mathbf{H}}(m)$  和所选择的接收机处理技术计算的基本空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}$ ；或（2）基于  $\underline{\mathbf{H}}(l)$ 、 $\underline{\mathbf{V}}(l)$  和所选择的接收机处理技术计算的用于传输跨度 1 的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(l)$ 。对于部分相关的  $\underline{\mathbf{H}}(m)$ ，初始空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_init}$  可以是初始猜测  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_base}(l)$  或基于所计算的用于另一传输跨度  $l$  的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(l)$  所获得的  $\tilde{\underline{\mathbf{M}}}_x(m)$ 。单元 718 基于初始空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_{x\_init}$  和用于传输跨度  $m$  的导引矩阵  $\underline{\mathbf{V}}(m)$  计算用于该传输跨度的空间滤波器矩阵  $\underline{\mathbf{M}}_x(m)$ 。对于部分相关的  $\underline{\mathbf{H}}(m)$ ，单元 718 可以基于初始空间滤波器矩阵对  $\underline{\mathbf{M}}_x(m)$  进行迭代过程的计算，其是

$\mathbf{M}_x(m)$ 的初始猜测。

处理器 638 为接入点 610 进行信道估计和空间滤波器矩阵计算，并可以用与处理器 678 相似的方式来实现。

本文描述的空间滤波器矩阵计算技术可以通过各种方式来实现。例如，这些技术可以用硬件、软件或软硬件结合的方式来实现。对于硬件实现，用于空间滤波器矩阵计算的处理单元可以实现在一个或多个专用集成电路（ASIC）、数字信号处理器（DSP）、数字信号处理器件（DSPD）、可编程逻辑器件（PLD）、现场可编程门阵列（FPGA）、处理器、控制器、微控制器、微处理器、用于执行本文所述功能的其他电子单元或其组合中。

对于软件实现，空间滤波器矩阵计算可用模块（例如，过程、函数等）来实现。这些软件代码可以存储在存储器单元（例如，图 6 中的存储器单元 642 和 682）中，并由处理器（例如，图 6 中的控制器 640 和 680）执行。存储器单元可以实现在处理器内或处理器外，在后一种情况下，其经由本领域中的各种公知手段，可通信地连接到处理器。

本文包含的标题用于参考，其旨在定位特定的章节。这些标题并非用于限制其下描述的概念的范围，这些概念可以应用到整个说明书的其他章节。

所公开实施例的上述描述使得本领域技术人员能够实现或者使用本发明。对于本领域技术人员来说，这些实施例的各种修改是显而易见的，并且本文定义的总体原理也可以在不脱离本发明的精神和保护范围的基础上应用于其他实施例。因此，本发明并不限于本文给出的实施例，而是与符合本文公开的原理和新颖特征的最广范围相一致。

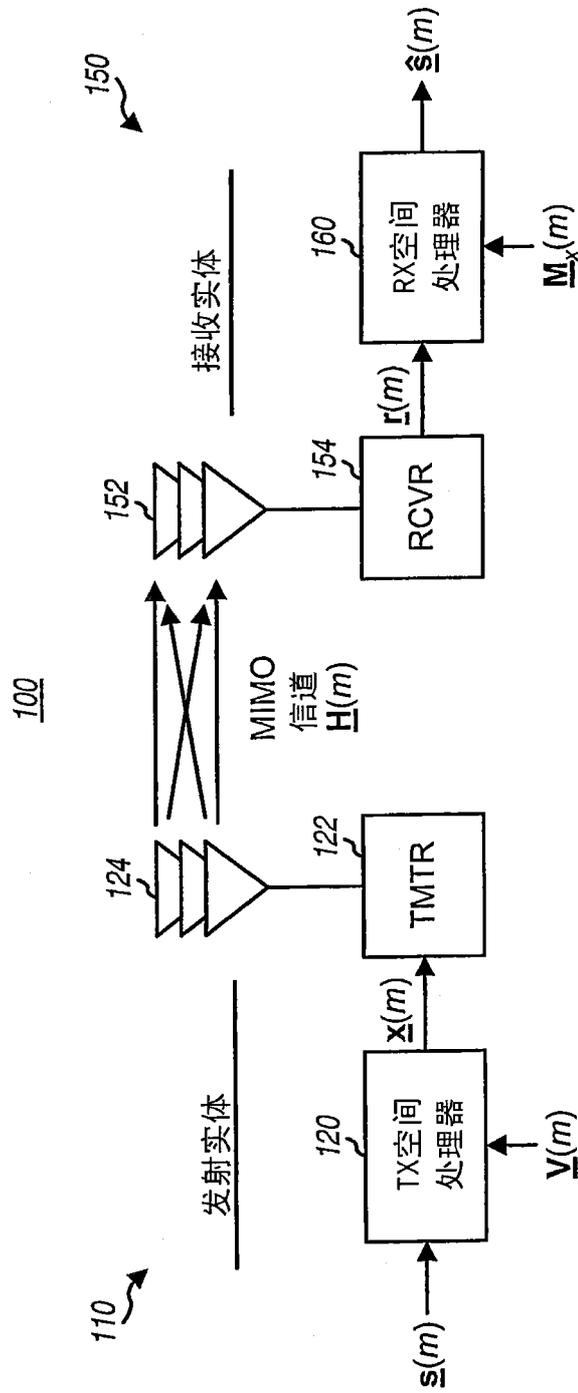
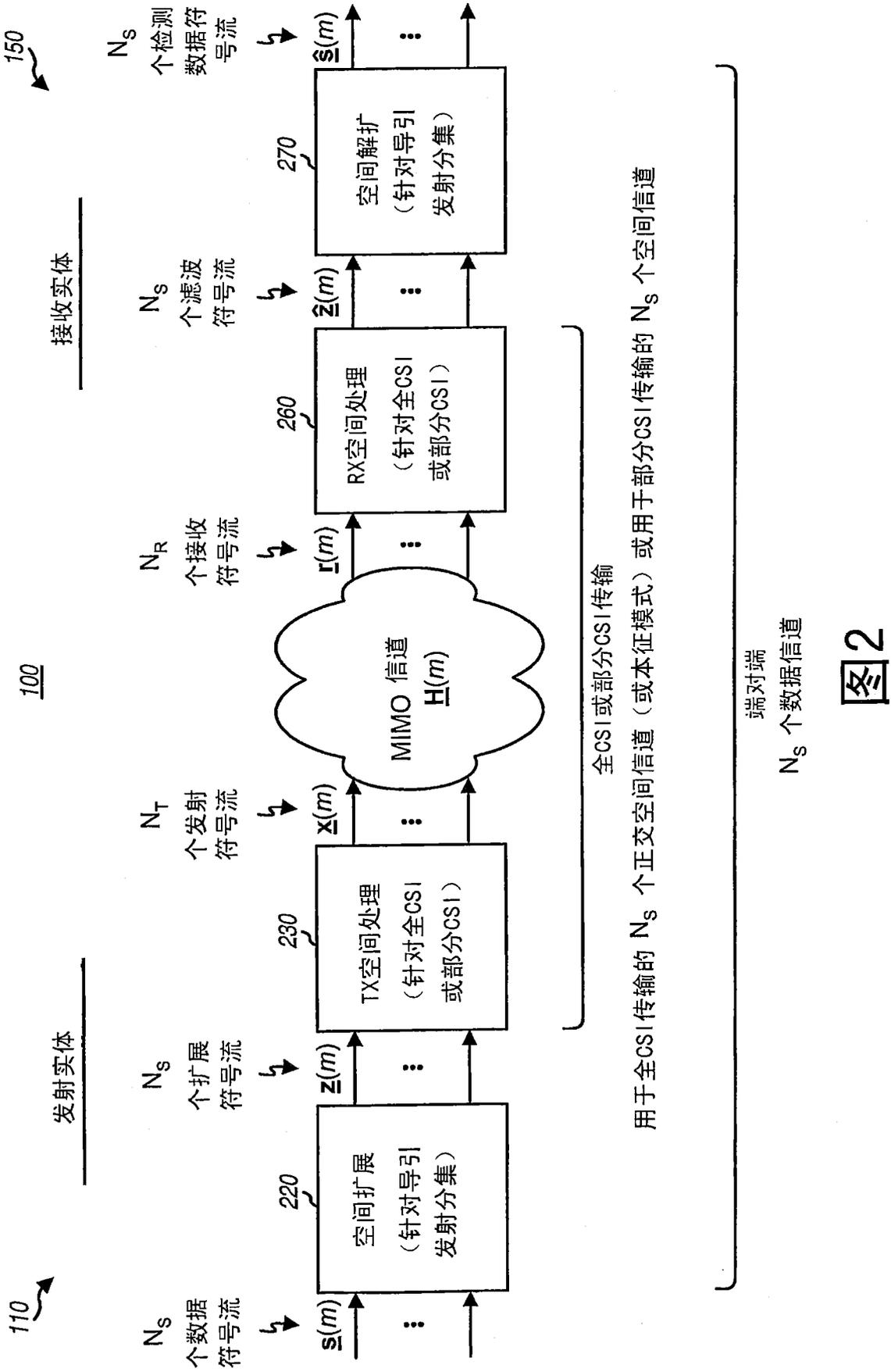


图1



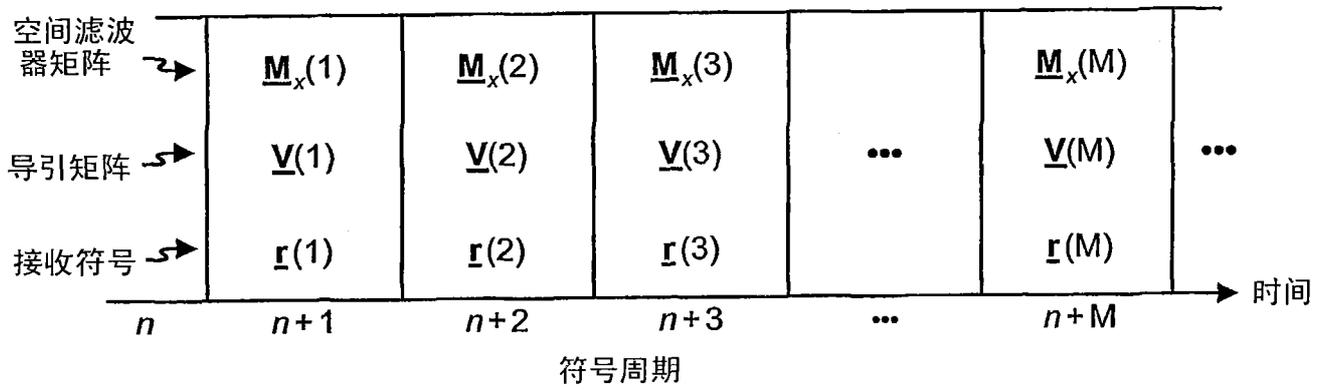


图3A

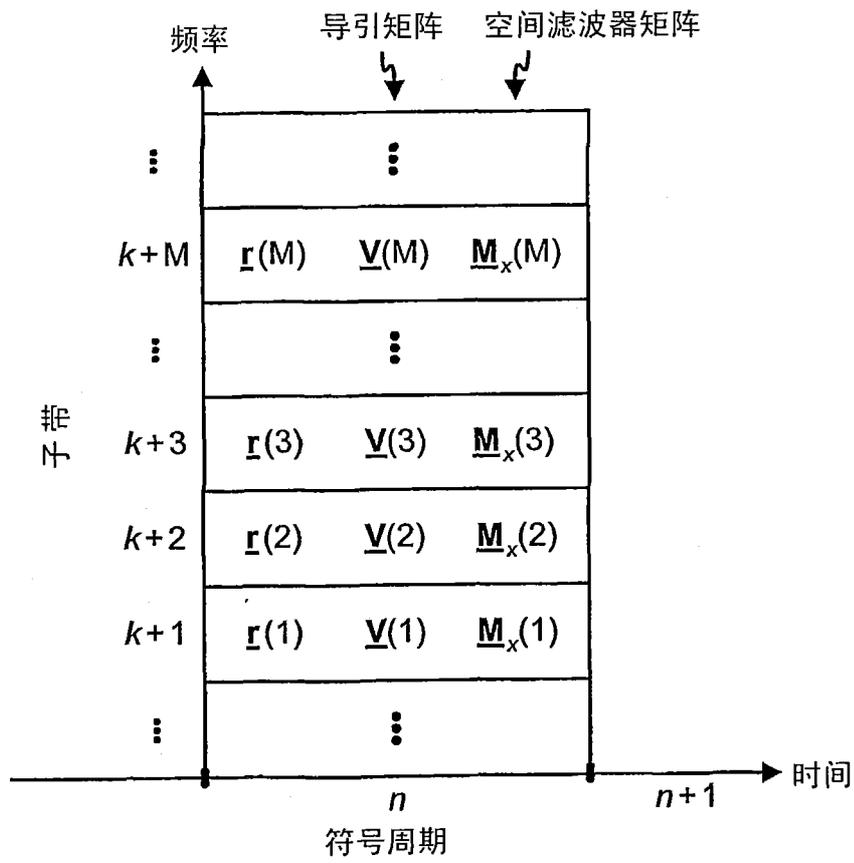


图3B

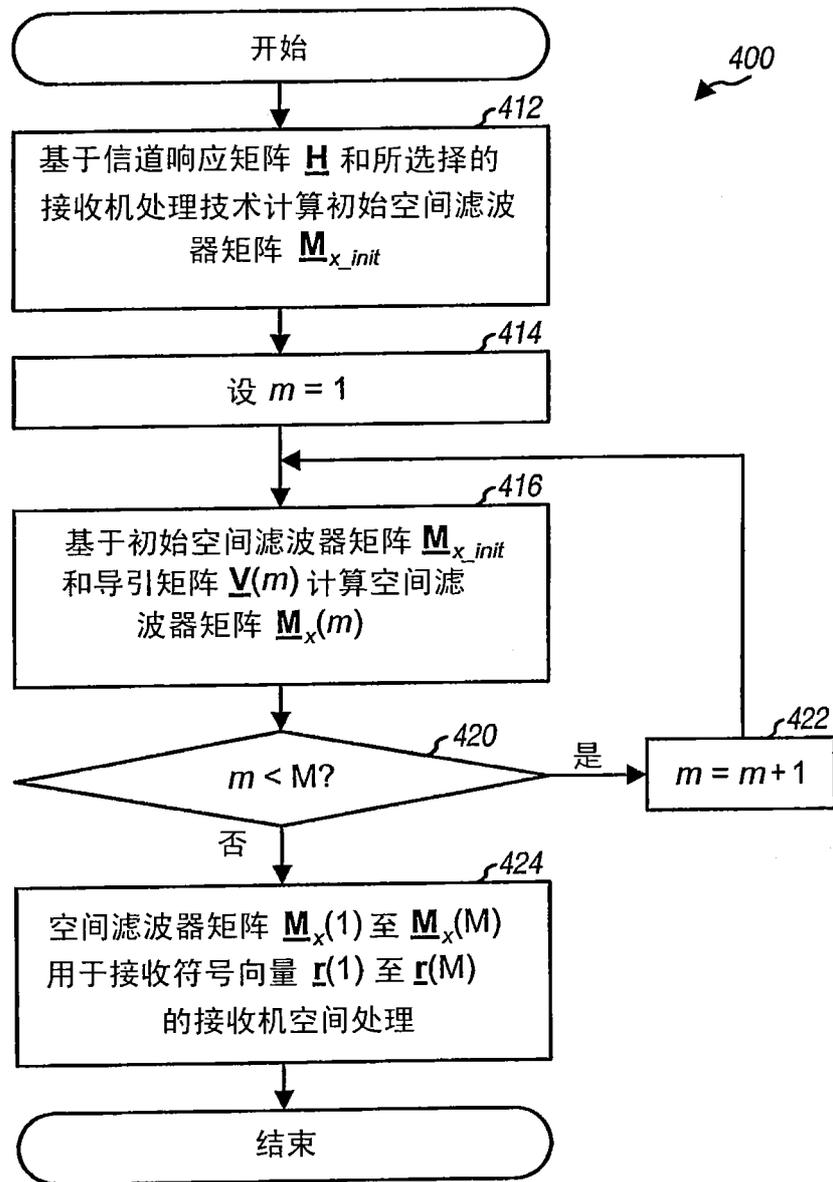


图4

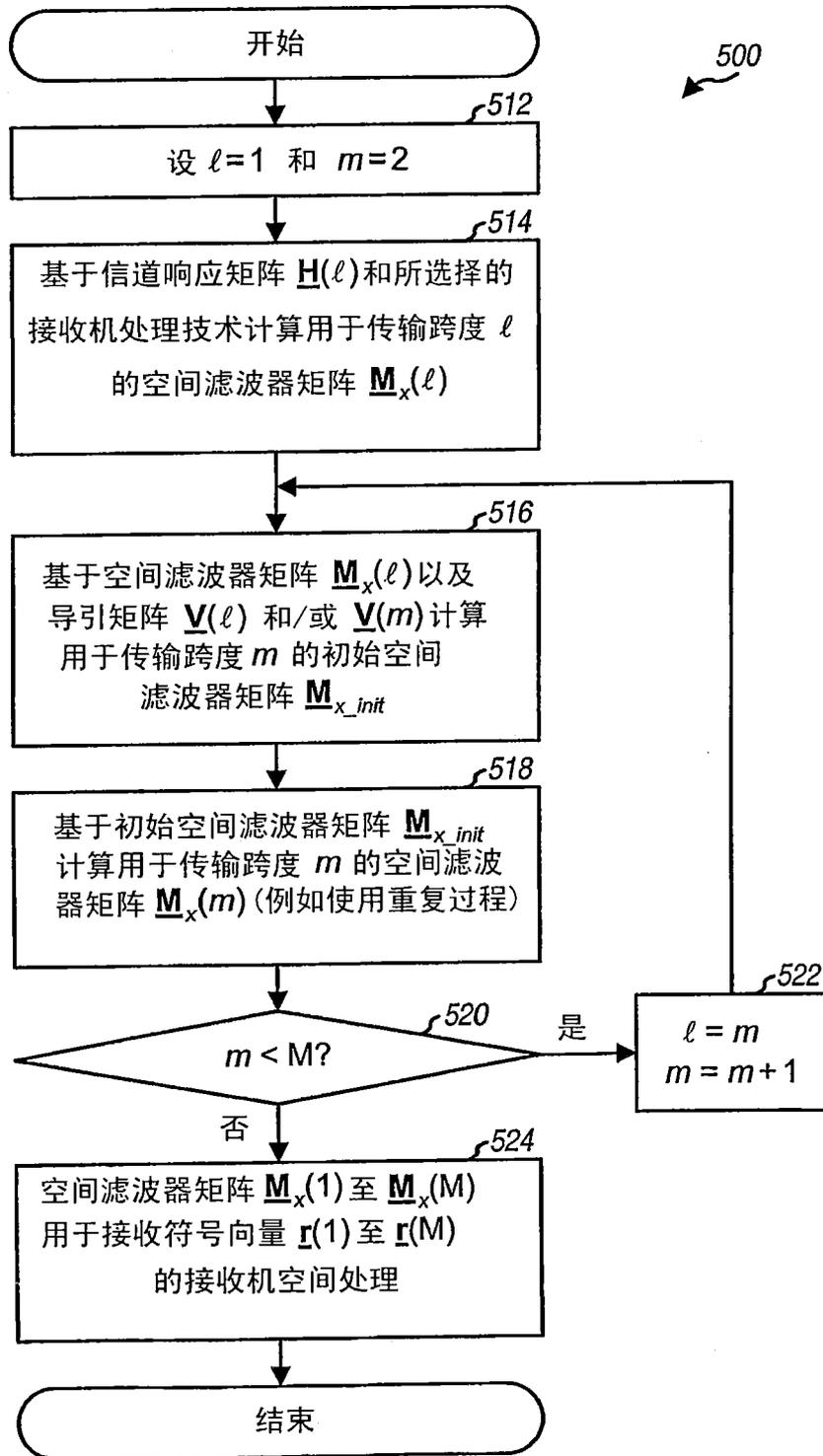


图5

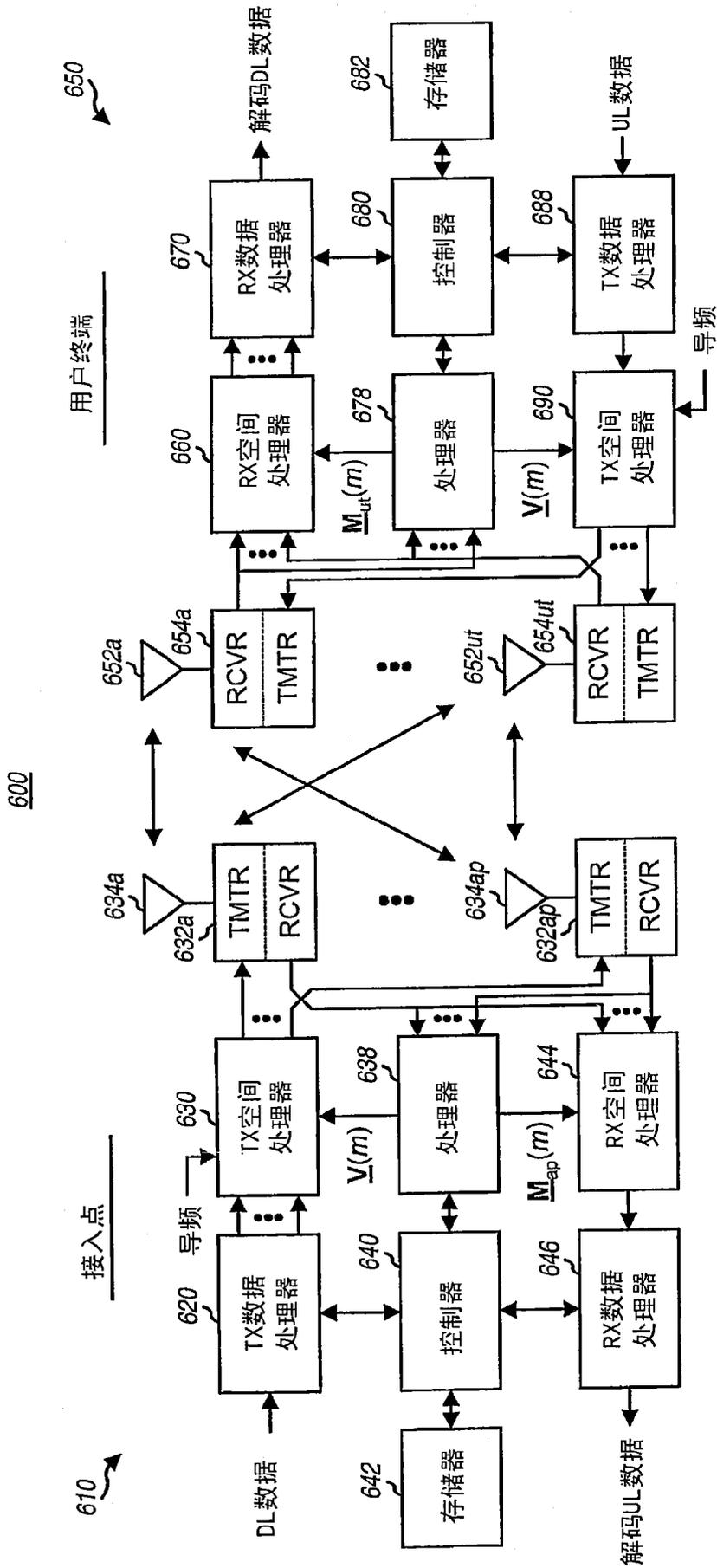


图6

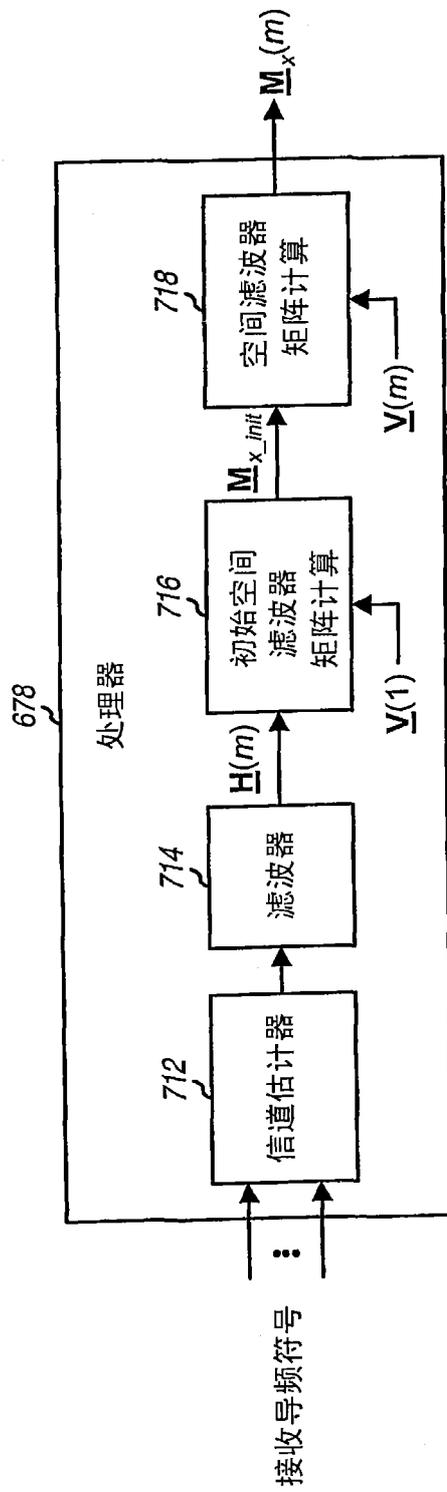


图7