

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H04B 1/707 (2006.01)

G06F 17/16 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200410078748.X

[45] 授权公告日 2008 年 5 月 28 日

[11] 授权公告号 CN 100391119C

[22] 申请日 2000.9.14

[21] 申请号 200410078748.X

分案原申请号 00812856.1

[30] 优先权

[32] 1999.9.14 [33] US [31] 60/153,801

[73] 专利权人 美商内数位科技公司

地址 美国特拉华州

[72] 发明人 拉吉曼尼·米斯拉 A·扎拉

[56] 参考文献

WO99/40698A1 1999.8.12

a novel and efficient solution to block - based joint - detection using approximate cholesky factorization. H. R. Karimi, N. W. Anderson. IEEE, Vol. 1574 No. 3. 1998

efficiency and scalability of two parallel QR factorizationalgorithms. J. Malard, C. C. Paige. scalable high. performance computing conference. 1994. proceedings of IEEE. 1994

审查员 王 侠

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司

代理人 李 玲

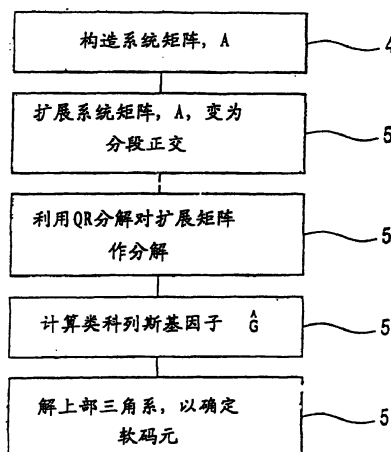
权利要求书 2 页 说明书 13 页 附图 3 页

[54] 发明名称

用来减少联合检测中的计算的方法与设备

[57] 摘要

接收器接收多个发射数据信号。该接收器测量与发射数据信号相关的信道响应。决定系统响应。系统响应被扩展为分段正交。部分基于该被扩展的系统响应而恢复接收数据信号。



1. 一种用于接收多个数据信号的使用者设备，所述使用者设备包含：
决定装置，用于部分地基于测得的信道响应来决定系统响应；
扩展装置，用于将所述系统响应扩展为分段正交；以及
恢复装置，用于部分地基于所述被扩展的系统响应从所述接收数据信号恢复数据。
2. 一种用于接收多个发射数据信号的使用者设备，所述使用者设备包含：
天线，用于接收所述发射数据；
信道估计装置，用于确定每一接收信号的信道响应；以及
具有一输入的联合检测装置，被配置成接收所述信道响应和所述接收数据信号，用于部分地基于所述信道响应决定一系统响应，将所述系统响应扩展为分段正交，以及部分地基于该扩展的系统响应从所述接收数据信号恢复数据。
3. 如权利要求 2 所述的使用者设备，其特征在于，该使用者设备被用于通过使用码分多址通讯系统来进行的时分双工。
4. 如权利要求 3 所述的使用者设备，其特征在于，每一所述发射数据信号具有一相关代码并在共享频谱上被发射，而系统响应是通过使所述相关代码与所述信道响应卷积而被决定。
5. 如权利要求 3 所述的使用者设备，其特征在于，所述信道估计装置使用与所述数据信号相关的接收训练序列来测量所述信道响应。
6. 如权利要求 2 所述的使用者设备，其特征在于，所述系统响应是一系统响应矩阵，还包括在扩展之前将所述系统响应矩阵分割为多个列块。

7. 如权利要求 6 所述的使用者设备, 其特征在于, 所述扩展是通过在所述列块中填塞 0 以使每一列块为正交。

用来减少联合检测中的计算的方法与设备

本申请是申请日为“2000 年 9 月 14 日”、申请号为“00812856.1”、题为“用来减少联合检测中的计算的方法与设备”的分案申请。

技术领域

本发明大致上涉及无线通讯系统。尤其是，本发明涉及无线通讯系统中的多重用户信号的联合检测。

背景技术

图 1 是无线通讯系统 10 的说明。该通讯系统 10 具有与用户设备 (UEs) 141 至 143 通讯的基站 121-125。每一基站在运作区域中具有与 UEs 141 至 143 通讯的相关运作区域。

于某些通讯系统中，例如码分多址 (code division multiple access, CDMA)，以及使用码分多址的时分复用 (time division duplex) (TDD/CDMA)，多重通信在相同的频谱上传送。这些通讯系统一般是通过其码片码序列 (chip code sequence) 而被区分为更有效率地使用频谱，TDD/CDMA 通讯系统使用被分为数个通讯用时隙的重复的帧。于此种系统中传送的通讯基于通讯的频宽将具有一个或多个码片码以及被指定于该码片码的时隙。

因为多重通讯可在相同的时间在频谱中传送，于此系统中的一接收器必须在多重通讯中被区别。一种检测此种信号的方法系单一用户检测。在单一用户检测中，接收器只使用与所需发射器相关的码检测来自所需发射器的通讯，并将其它发射器的信号视为干扰来处理。

在一些情况中，能够同时检测多重通讯以便改良性能是我们所希望的。同时检测多重通讯被称为联合检测。某些联合检测器使用科列斯基分解法 (Cholesky decomposition) 以执行最小均方误差 (minimum mean square error, MMSE) 检测，以及迫零块均衡器 (zero-forcing equalizer, ZF-BLEs)。

这些检测器具有需要广大的接收器资源的高复杂度。

因此，我们希望具有另一种联合检测的方法。

发明内容

多个发射数据信号在一接收器被接收。此接收器测量与该发射数据信号相关的信道响应。决定系统响应。该系统响应被扩展为分段正交 (piecewise orthogonal)。接收数据信号一部分地基于被扩展的系统响应而被恢复。

根据本发明的第一方面，提供一种用于接收多个数据信号的使用者设备，所述使用者设备包含：决定装置，用于部分地基于测得的信道响应来决定系统响应；扩展装置，用于将所述系统响应扩展为分段正交；以及恢复装置，用于部分地基于所述被扩展的系统响应从所述接收数据信号恢复数据。

根据本发明的第二方面，提供一种用于接收多个发射数据信号的使用者设备，所述使用者设备包含：天线，用于接收所述发射数据；信道估计装置，用于确定每一接收信号的信道响应；以及具有一输入的联合检测装置，被配置成接收所述信道响应和所述接收数据信号，用于部分地基于所述信道响应决定一系统响应，将所述系统响应扩展为分段正交，以及部分地基于该扩展的系统响应从所述接收数据信号恢复数据。

根据本发明的第三方面，提供一种在接收器中用于接收多个数据信号的电路，所述电路包含：输入，被配置成接收所述被接收的数据信号；决定装置，用于部分地基于测得的信道响应来决定系统响应；扩展装置，用于将所述系统响应扩展为分段正交；以及恢复装置，用于部分地基于所述被扩展的系统响应从所述接收数据信号恢复数据。

根据本发明的第四方面，提供一种用于接收多个发射数据信号的电路，所述电路包含：天线，用于接收所述发射数据；信道估计装置，用于确定每一接收信号的信道响应；以及具有一输入的联合检测装置，被配置成接收所述信道响应和所述接收数据信号，用于部分地基于所述信道响应决定一系统响应，将所述系统响应扩展为分段正交，以及部分地基于该扩展的

系统响应从所述接收数据信号恢复数据。

附图简要说明

图 1 是一无线通讯系统。

图 2 是使用联合检测的简化发射器及接收器。

图 3 是一通讯短脉冲串(burst)的说明。

图 4 是降低计算联合检测的说明。

较佳实施例详说明

图 2 表示在 TDD/CDMA 系统中使用联合检测的简化的发射器 26 及接收器 28。在一典型的系统中,发射器 26 位于每一 UE 141 至 143,而传送多重通讯的多重发射电路 26 位于每一基站 121 至 125 之中。基站 121 一般需要至少一个发射电路 26 以让每一现用通讯 UE 124 至 143 使用。该联合检测接收器 28 可以在一基站 121, UE 141 至 143, 或二者。联合检测接收器 28 从多重发射器 26 或发射电路 26 接收通讯。

每一通讯在无线通讯信道 30 上传送数据。在发射器 26 中的数据发生器 32 产生将在相关信道上被通讯至接收器 28 的数据。相关数据基于通讯频率需求被指定给一个或多个代码及/或时隙。扩展和训练序列插入装置 34 扩展相关信道数据,并使被扩展的相关数据与一训练序列在被指定的适合的时隙及码内时序多重。所产生的序列称为一通讯短脉冲串(burst)。此通讯短脉冲串被一调制器 36 调制为射频。天线 38 经由无线射频信道 30 被发射至接收器 28 的天线 40。此种被用以发射通讯的型态可以是本领域技术人员所知的任一种,例如直接相移键控(direct phase shift keying; DPSK)或正交相移键控(quadrature phase shift keying; QPSK)。

典型的通讯短脉冲串 16 具有一中置码(midamble)20,一防护期间(guard period)18 以及二数据短脉冲串 22,24,图 3 所示。该中间走动 20 分离该二数据短脉冲串 22,24,而该防护期间 18 分隔该数据短脉冲串以允许来自不同发射器的短脉冲串的到达时间的差别。此二数据短脉冲串 22,24 包含通讯短脉冲串的数据且一般具有相同的码元(symbol)长度。

接收器 28 的天线 40 接收不同的射频信号。被接收的信号被解调器 42 解调变以产生一基带信号。该基带信号被处理，例如通过一信道估测装置 44 及一联合检测装置 46，在时隙中被处理，并具有被指定给相对发射器 26 的通讯短脉冲串的适合代码。该信道估计装置 44 使用在基频中的训练序列成份以提供信道信息，例如信道脉波响应。此信道信息由联合检测装置 46 所使用以估计被接收的通讯短脉冲串的发射数据做为软码元(soft symbol)。

此联合短脉冲串装置 46 使用由信道估计装置 44 所提供的信道信息以及被发射器 26 所使用的已知扩展码而估计不同的接收短脉冲串的数据。虽然联合检测系结合 TDD/CDMA 系统而被描述，相同的方法可应用于其它通讯系统，如 CDMA。

一种在 TDD/CDMA 系统中特定时隙中的联合检测的方法被表示于图 4。多个通讯短脉冲串相互交叠于一特定时隙中，如 K 个通讯短脉冲串。K 个通讯短脉冲串可能来自 K 个不同的发射器。如果特定的发射器在特定的时隙内正使用多重码，则 K 短脉冲串可能来自小于 K 个发射器。

通讯短脉冲串 16 的每一数据短脉冲串 22,24 具有一预定数目的发射码元，如 N_s 。每一码元使用一预定数量的扩展码的码片而被发射，该码片为扩展因子(spreading factor)。在一典型的 TDD 通讯系统中，每一基站 121 至 125 具有与其通讯数据混合相关的扰码。该扰码区分出每一基站。一般扰码并不影响该扩展因子。虽然此处使用扩展码及因子等名词，对于使用扰码的系统而言，以下的扩展码是结合了的扰码及扩展码。每一数据短脉冲串 22,24 具有 $N_s \times SF$ 个码片。

联合检测装置 46 估计每一数据短脉冲串被原始发射的值。方程式 1 被用以决定未知的发射码元。

$$\underline{r} = \underline{A}\underline{d} + \underline{n} \quad \text{方程式 1}$$

在方程式 1 中，已知被接收组合码片 $\underline{r}$ 是系统响应 $\underline{A}$ 以及未知发射码元 $\underline{d}$ 的积。符号 $\underline{n}$ 表示在无线射频信道中的噪声。

对 K 个数据短脉冲串而言，将被还原的数据短脉冲串的数目为 $N_s \times K$ 。为分析的目的，未知的数据短脉冲串码元被安排至一列矩阵(column array),

d。 d 矩阵具有未知数据码元的列块 d_i 至 d_{Ns}。每一数据码元区块 d_i 在每一 K 数据短脉冲串内具有 i^{th} 个未知发射数据码元。因此，每一列块 d 具有 K 未知发射数据码元互相堆叠于上方。该数据区块也于一列中相互堆叠于上方，如 d₁ 在 d₂ 之上，依此类推。

联合检测装置 46 接收每一码片于被接收时的值。每一被接收码片是所有 K 通讯短脉冲串的复合。为分析的目的，合成的码片被安排至一列矩阵 r。该矩阵 r 具有每一复合码片的值，共 $Ns \times SF$ 码片。

A 是系统响应矩阵。系统响应矩阵 A 是通过脉波响应与每一通讯短脉冲串码片码的卷积(convolve)而被形成。此卷积结果被重新安排以形成系统响应矩阵 A (步骤 48)。

联合检测装置 46 接收来自信道估计装置 44 的 K 通讯短脉冲串的每一 i^{th} 信道脉波响应 h_i。每一 h_i 具有一长度为 W 的码片。联合检测装置以已知 K 通讯短脉冲串的扩展码卷积该信道脉波响应以决定 K 通讯短脉冲串的码元响应 s₁ 至 s_k。对所又码元而言是相同的共同支持子区块 S 的长度为 $K \times (SF + W - 1)$ 。

A 矩阵被设计成具有 Ns 区块 B₁-B_{Ns}。每一区块具有全部被安排为与对应的 d 矩阵 d₁ 至 d_{Ns} 中的数据区块相乘的码元响应 s₁ 至 s_k。例如，d₁ 与 B₁ 相乘。此码元响应 s₁ 至 s_k，形成在每一区块矩阵 B_i 中一行，区块的其它部分被填入 0。在第一区块 B₁，此码元响应列在第一行开始。在第二区块，此码元响应列为在区块中较低的 SF 列，依此类推。因此，每个区块具有 K 宽度以及 $Ns \times SF$ 的高度。方程式 2 说明一个显示分割的 A 区块矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} \begin{matrix} s_1 & s_2 & \dots & s_x \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \begin{matrix} s_1 & s_2 & \dots & s_x \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \begin{matrix} s_1 & s_2 & \dots & s_x \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [B_1 \ B_2 \ \dots \ B_{N_s}]$$

方程式 2

$\underline{n}$ 矩阵具有对应每一被接收合成码片的噪声值，总共 $N_s \times SF$ 码片。
为分析的目的， $\underline{n}$ 矩阵在被接收合成码片矩阵 $\underline{r}$ 中是固有的。

使用区块记数法(notation)，方程式 1 可以被重写为方程式 3。

$$\underline{r} = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ \dots \ B_{N_s}] \times \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_{N_s} \end{bmatrix} + \underline{n} = \sum_{i=1}^{N_s} B_i \cdot d_i + \underline{n}$$

方程式 3

使用 $\underline{r}$ 矩阵的噪声版本，每一未知码元可以通过解答此方程式而被决定。然而，使用强力算法(brute force approach)来解答方程式 1 需要大量的处理。

为降低处理，系统响应矩阵 A 被重新分割。每一区块 B_i 被分割为宽度 K 以及高度 SF 的 N_s 区块。

这些新区块被称为 A_1 至 A_L 以及 0 。 L 为共同支持 S ，当被新区块 A_1 至 A_L 的高度分割时，经由方程式 4。

$$L = \left\lceil \frac{SF + W - 1}{SF} \right\rceil$$

方程式 4

方块 A1 至 AL 由支持 $\underline{s}1$ 至 $\underline{s}k$ 以及共同支持 S 所决定。A0 区块是具有全部 0 的区块。W 为 57, SF 为 16 且 L 为 5 系统的重新分割矩阵被表示于方程式 5。

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_3 & A_2 & A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_4 & A_3 & A_2 & A_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_5 & A_4 & A_3 & A_2 & A_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_5 & A_4 & A_3 & A_2 & A_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_5 & A_4 & A_3 & A_2 & A_1 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_5 & A_4 & A_3 & A_2 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 & A_4 & A_3 & \ddots & A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 & A_4 & \ddots & A_2 & A_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 & \ddots & A_3 & A_2 & A_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & A_4 & A_3 & A_2 & A_1 \end{bmatrix}$$

方程式 5

为降低矩阵的复查度，一分段正交化(piecewise orthogonalization)被使用。任何 i 为 L 或更大的区块 B_i 相对任何之前的 L 区块为非正交，而相对任何被大于 L 所领先的区块为正交。在重新分割 A 矩阵中的每个 0 是一全部 0 区块。使用分段正交化的结果，A 矩阵被扩展(步骤 50)。

A 矩阵是由填充 $L-1$ 0 区块至 A 矩阵的每一区块并移动在 A 矩阵中其列号小于 1 的每一列而被扩展。为表示图 2 的列 2 中的 A1 区块, 4 个 $(L-1)0$ 被插入列 2 的 A1 与 A2 之中。此外, 区块 A1(以及 A2)被右移一行(列 2-1)。因此, 方程式 5 在扩展之后变成方程式 6。

$$A_{exp} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 & 0 & A_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 & 0 & 0 & 0 & A_2 & 0 & 0 & 0 & A_1 \\ 0 & 0 & 0 & A_4 & 0 & 0 & 0 & A_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 & 0 & 0 & 0 & A_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_5 & 0 \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

方程式 6

为符合被扩展的 A 矩阵, $\underline{d}$ 矩阵也必须被扩展 $\underline{dexp}$ 。每一区块 $\underline{d1}$ 至 $\underline{dNs}$ 被扩展为新的区块 $\underline{dexp1}$ 至 $\underline{dexpNs}$ 。每一被扩展区块 $\underline{dexp1}$ 至 $\underline{dexpNs}$ 是由重复原始区块 L 次而获得。以 $\underline{dexp1}$ 为例, 第一区块列将被产生为具有 $\underline{d1}$ 的 L 版本, 相互重叠于下方。

因此, 方程式 1 可被重写为方程式 7。

$$\begin{aligned} \underline{r} &= A_{exp} \cdot \underline{d_{exp}} + \underline{n} \\ &= \begin{bmatrix} B_{exp1} & B_{exp2} & B_{exp3} & \dots & B_{expN_s} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{d_{exp1}} \\ \underline{d_{exp2}} \\ \underline{d_{exp3}} \\ \vdots \\ \underline{d_{expN_s}} \end{bmatrix} + \underline{n} = \sum_{i=1}^{N_s} B_{expi} \underline{d_{expi}} + \underline{n}. \end{aligned}$$

方程式 7

方程式 7 可被重写以将每一 B_{expi} 正交分割为 L 部分, $U_j^{(l)}$, $j = 1$ 至 L , 如方程式 8。

$$\underline{r} = A_{exp} \cdot \underline{d_{exp}} + \underline{n}$$

$$= \sum_{i=1}^N [U_1^{(i)} \ U_2^{(i)} \ \dots \ U_L^{(i)}] \times \begin{bmatrix} \underline{d_1} \\ \underline{d_2} \\ \underline{d_3} \\ \vdots \\ \underline{d_L} \end{bmatrix} + \underline{n} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L U_j^{(i)} \underline{d_j} = \sum_{j=1}^N B_j \cdot \underline{d_j} + \underline{n}$$

方程式 8

为降低计算的复杂度，Aexp 矩阵的 QR(正交矩阵三角化)分解被执行(步骤 52)。方程式 9 表示 Aexp 的 QR 分解。

$$A_{exp} = Q_{exp} R_{exp} \quad \text{方程式 9}$$

由于 Aexp 的正交分割，Aexp 的 QR 分解较不复杂。所产生的 Qexp 及 Rexp 矩阵于 L 区块上具暂态延伸的周期性。因此，Qexp 及 Rexp 可由计算起始暂态及周期性部分的周期而被决定。此外，矩阵的周期性部分是由正交化的 A1 至 AL 而被有效率地决定。有一种 QR 分解的方法是 Gramm-Schmidt 正交法。

为如同方程式 6 中的正交 Aexp，Bexp1 是通过正交每一其正交部分 {Uj⁽ⁱ⁾}, j = 1 L 而被独立正交化。每一 {Aj}, j = 1 L 系被独立正交，而此集合被适合的填充 0。{Qi}是由正交化的 {Uj(i)} 所获得的标准正交集。为决定 Bexp2，其 U1⁽²⁾ 需要仅相对于之前形成的 Bexp 的 Q2 而被正交化。U2⁽²⁾, U3⁽²⁾ 及 U4⁽²⁾ 只需要分别相对于 Q3, Q4 及 Q5 而被正交化。U5⁽²⁾ 需有对所有先前的 Qs 正交化，且其正交化结果仅为从正交 Bexp1 所获得的位移版本 Q5。

随正交化继续进行，在初始暂态之外，产生一周周期性，其可被摘要说明如下。其 Q4 是由正交化 A5 所获得，然后被填充以 0。其 Q4 是从正交化 Q5 的支持(support)以及 A4, {sup(Q5)A4}, 然后被填充以 0。因为 sup(Q5) 已经是一个正交集，只有 A4 需要相对于 sup(Q5) 及其本身而被正交化。其 Q3 是从正交化 [sup(Q5) sup(Q4)A3] 所获得，然后被填充以 0。其 Q2 是从正交化 [sup(Q5) sup(Q4) sup(Q3)A2] 所获得，然后被填充以 0。其 Q1 是从正交化 [sup(Q5) sup(Q4) sup(Q3) sup(Q2)A1] 所获得，然后被填充以 0。

除了初始暂态之外，整个 A_{exp} 可以被有效率的正交化，经方程式 10，仅由正交化 A_p 。

$$A_p = [A_5 \ A_4 \ A_3 \ A_2 \ A_1] \quad \text{方程式 10}$$

通过有效的以仅使用 A_p 正交化 A_{exp} 的周期性部分，计算的效率可被达成。使用较复杂的计数法，对 $\text{sup}(Q_i)$ 的 Q_i s， A_p 结果的正交产生于方程式 11 的标准正交矩阵 Q_p 之中。

$$Q_p = [Q_1^T \ Q_2^T \ Q_3^T \ Q_4^T \ Q_5^T]$$

方程式 11

Q_{exp} 的周期性部分经由方程式 12。

$$\text{PeriodicPart of } Q_{\text{exp}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_1^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & Q_2^T & 0 & 0 & 0 & Q_1^T & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & Q_3^T & 0 & 0 & 0 & Q_2^T & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & Q_4^T & 0 & 0 & 0 & Q_3^T & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_5^T & 0 & 0 & 0 & Q_4^T & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_5^T & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}$$

方程式 12

为建构矩阵 R_{exp} 上部三角矩阵， $\langle A_i \rangle_j$ 是尺寸为 $K \times K$ 的区块，代表 A_i 每一行在所有 Q_j^s 的投射。例如， $\langle A_4 \rangle_5$ 的第一行表示 A_4 的第一行在 Q_5 s 的 K 行的每一行上的投射。同样地， $\langle A_4 \rangle_4$ 表示 A_4 的第一行在 Q_4 s 的 K 行的每一行上的投射。然而，此区块将是上部三角，因为 A_4 的 K^{th} 行属于由 Q_5 s 的标准正交向量及 Q_4 s 的第一 k 向量所生成的空间。此区块与 Q_4 s 中的随后的向量正交，导致一上部三角 $\langle A_4 \rangle_4$ 。任何 $i = j$ 的 $\langle A_i \rangle_j$ 将是上部三角。为正交化其它区块，产生以下结果。

$B_{\text{exp}5}$ 的第一区块 viz. $U1^{(5)}$ 是由 $\{Q_j^s\}$, $j = 1..5$ 的线性组合所形成，其

系数为 $\langle A_1 \rangle_j, j = 1 \sim 5$ 所给予。第二区块 $U_1^{(2)}$ 是由 $\{Q_{js}\}, j = 2 \sim 5$ 的线性组合所形成, 其系数为 $\langle A_1 \rangle_j, j = 2 \sim 5$ 所给予。第三区块 $U_1^{(3)}$ 是由 $\{Q_{js}\}, j = 3 \sim 5$ 的线性组合所形成, 其系数为 $\langle A_1 \rangle_j, j = 3 \sim 5$ 所给予。第四区块 $U_1^{(4)}$ 是由 $\{Q_{js}\}, j = 4, 5$ 的线性组合所形成, 其系数为 $\langle A_1 \rangle_j, j = 4, 5$ 所给予。第五区块 $U_1^{(5)}$ 是由 $Q_{5s} \times \langle A_5 \rangle_5$ 所形成。

因此, 在接下来的 $B_{\text{exp}i}, i > 6$ 的扩展中的系数仅是上述周期性的延伸。因为 R_{exp} 项目在 A_{exp} 的正交期间被计算, 不需要建构 R_{exp} 的额外计算。不管初始暂态, R_{exp} 的余项是周期性的, 且其二周期表示于方程式 13。

$$R_{\text{exp}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \langle A_1 \rangle_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \langle A_1 \rangle_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \langle A_1 \rangle_5 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \langle A_1 \rangle_2 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_3 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_4 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_5 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & 0 & \dots \\ \langle A_1 \rangle_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \langle A_1 \rangle_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \langle A_1 \rangle_1 \end{bmatrix}$$

方程式 13

解答 Q_{exp} 及 R_{exp} 的最小平方法(least square approach)表示于方程式 14。

$$Q_{\text{exp}} \cdot R_{\text{exp}} \cdot \underline{d}_{\text{exp}} = \underline{r} \quad \text{方程式 14}$$

通过以 Q_{exp} 的转置矩阵 Q_{exp}^T 预先乘以方程式 14 的二侧, 并使用 $Q_{\text{exp}} \cdot Q_{\text{exp}}^T = I$ 变换, 方程式 14 变成方程式 15。

$$R_{\text{exp}} \cdot \underline{D}_{\text{exp}} = Q_{\text{exp}}^T \underline{r} \quad \text{方程式 15}$$

方程式 15 代表一三角系统, 其解也解答方程式 14 的 LS 问题。

由于扩展, 未知的数字以一 L 因子增加。因为该未知数是由一 L 因子所表示, 为降低复杂度, 此重复的未知数可被收集以塌缩系统。Rexp 使用 L 系数区块 CF1 至 CFL 而被塌缩, 每一区块的宽度及高度为 K 。对于具有 L 为 5 的系统, CF1 至 CF 5 可被决定如方程式 16。

$$\begin{aligned} CF_1 &= \langle A_1 \rangle_1 + \langle A_1 \rangle_2 + \langle A_1 \rangle_3 + \langle A_1 \rangle_4 + \langle A_1 \rangle_5 \\ CF_2 &= \langle A_1 \rangle_2 + \langle A_1 \rangle_3 + \langle A_1 \rangle_4 + \langle A_1 \rangle_5 \\ CF_3 &= \langle A_1 \rangle_3 + \langle A_1 \rangle_4 + \langle A_1 \rangle_5 \\ CF_4 &= \langle A_1 \rangle_4 + \langle A_1 \rangle_5 \\ CF_5 &= \langle A_1 \rangle_5 \end{aligned}$$

$$\text{方程式 16}$$

使用系数区块塌缩 Rexp 产生类柯列斯基系数(Cholesky-like)G(步骤 54)。通过在方程式 15 右侧执行类比运算产生高与宽为 $K \times N_s$ 的带状上三角, 如方程式 17。

$$\begin{bmatrix} Tr_1 & Tr_2 & Tr_3 & Tr_4 & CF_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & Tr_1 & Tr_2 & CF_2 & CF_4 & CF_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & CF_1 & CF_3 & CF_3 & CF_4 & CF_5 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & CF_1 & CF_3 & CF_3 & CF_4 & CF_5 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & CF_5 & CF_3 & CF_3 & CF_4 & CF_5 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{d}_1 \\ \underline{d}_2 \\ \underline{d}_3 \\ \vdots \\ \underline{d}_{N_s} \end{bmatrix} = \underline{\hat{r}}$$

$$\text{方程式 17}$$

Tr^1 至 Tr^4 系暂态项目及 γ 。经由向后取代(back substitution)通过解答上三角, 方程式 17 可被解答以决定 $\underline{d}$ (步骤 56)。因此, 发射的 K 数据短脉冲串的数据码元可被决定。

使用片段正交法及 QR 分解，解答最少平方问题的复杂度与习知以协调科列斯基分解相比下降了 6.5 因子。

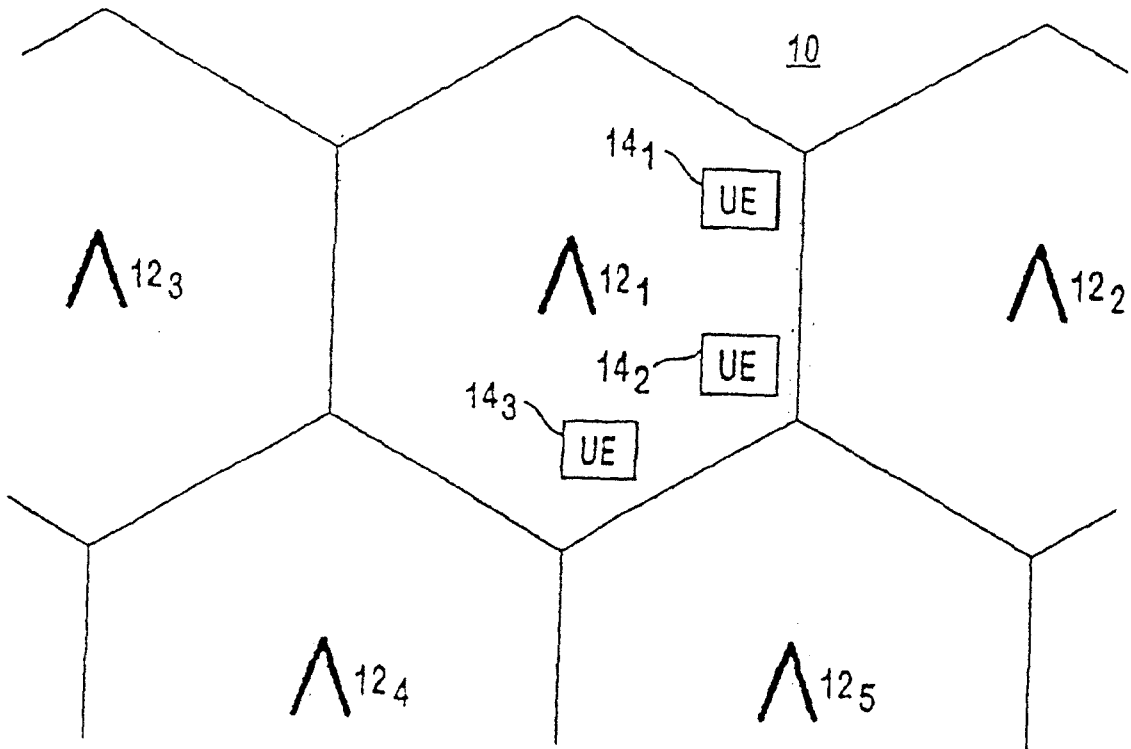


图 1

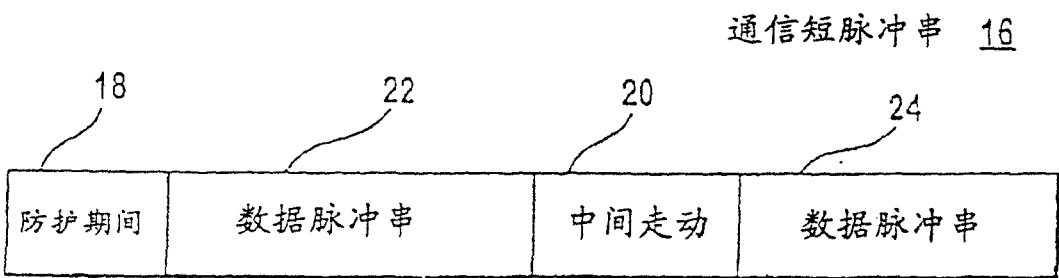


图 3

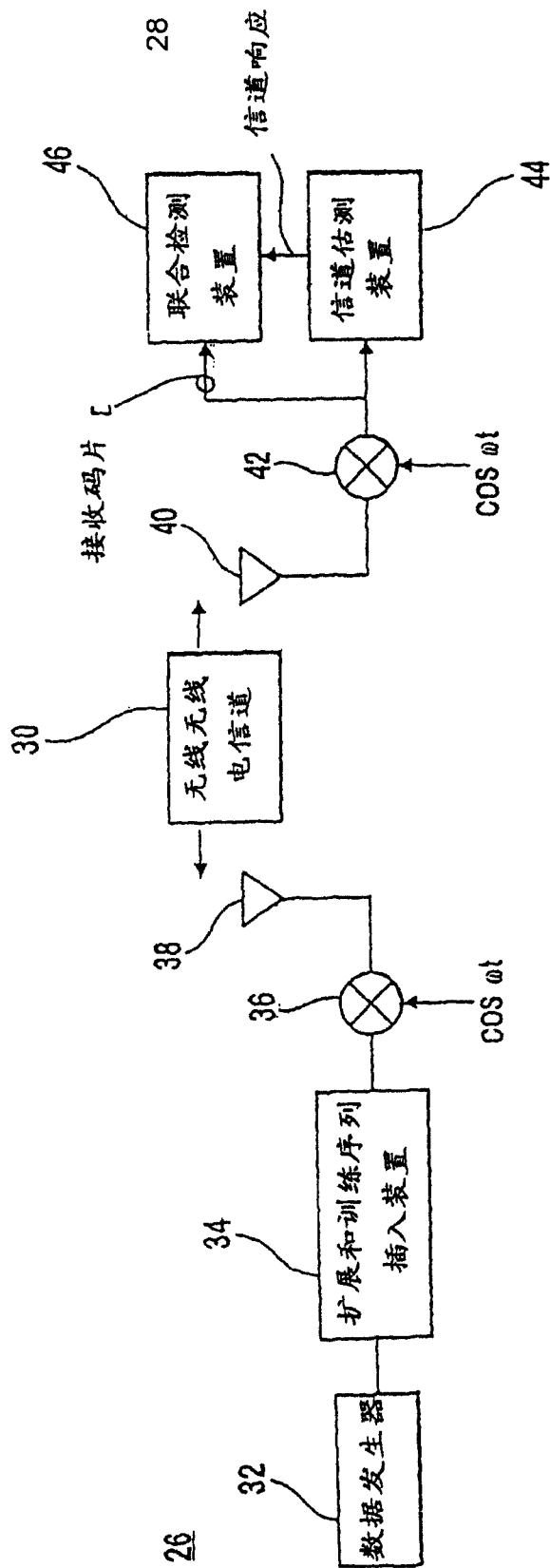


图 2

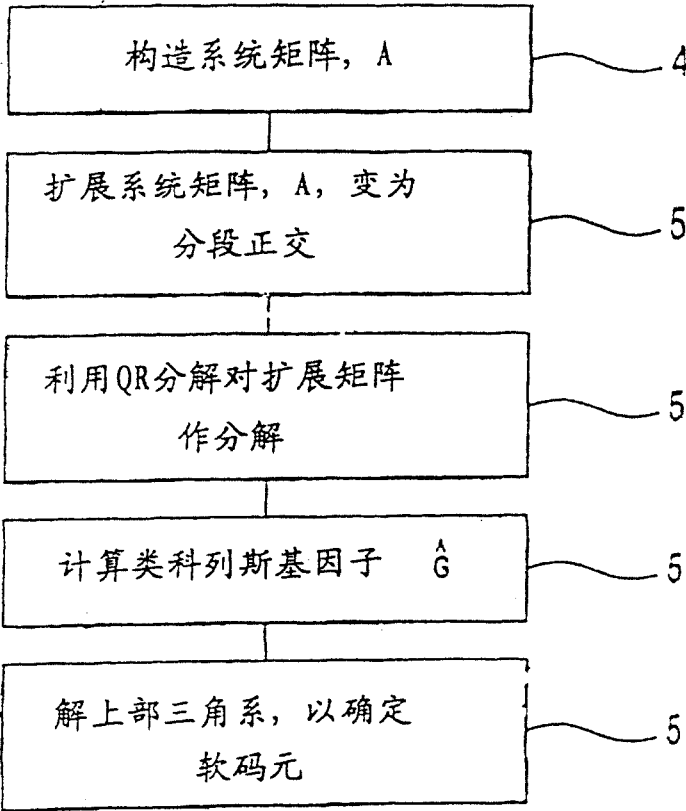


图 4