



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 106574952 B

(45) 授权公告日 2020.12.22

(21) 申请号 201580043547.2

(22) 申请日 2015.08.14

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106574952 A

(43) 申请公布日 2017.04.19

(30) 优先权数据
14192427.4 2014.11.10 EP

(66) 本国优先权数据
PCT/CN2014/084407 2014.08.14 CN

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2017.02.14

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2015/068804 2015.08.14

(87) PCT国际申请的公布数据
W02016/024024 EN 2016.02.18

(73) 专利权人 皇家飞利浦有限公司

地址 荷兰艾恩德霍芬

(72) 发明人 黄璐巍

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

代理人 孟杰雄 王英

(51) Int.Cl.

G01R 33/36 (2006.01)

G01R 33/3415 (2006.01)

(56) 对比文件

US 2007013375 A1, 2007.01.18

US 7279893 B1, 2007.10.09

CN 101971045 A, 2011.02.09

审查员 王丽娜

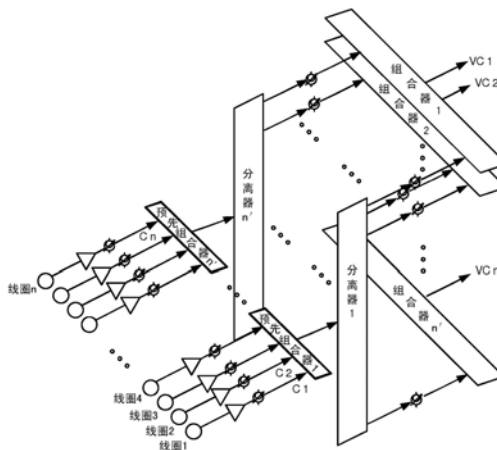
权利要求书2页 说明书10页 附图3页

(54) 发明名称

用于硬件RF接收器通道减少的方法和装置

(57) 摘要

公开了用于硬件线圈压缩的方法和装置。被配置用于同一感兴趣区域的阵列中的线圈被分组到子阵列中。每个子阵列的线圈在进一步处理之前利用硬件组合器进行预先组合。包括所述预先组合器的预先组合转换器是灵活的,即,可应用于例如非圆柱形线圈;比软件压缩算法的直接实施更简单;并且在商业上可行。



将接收器通道转换成虚拟接收器通道的具有预先组合器、分离器和组合器的转换器

1. 一种用于磁共振成像 (MRI) 的通道压缩的方法, 包括:

使用 n' 个预先组合器对来自被配置用于对同一感兴趣区域 (ROI) 进行成像的 n 线圈阵列的 n 个线圈的 n 个输出 C_1, C_2, \dots, C_n 进行预先组合, 以获得较少的 n' 个预先组合输出, 其中, n' 是大于 1 的整数, 其中, 所述 n 个线圈基于所述 n 个线圈中的每个的重要性的顺序而被分组到 n' 个子阵列中, 所述重要性由所述线圈的所述输出对通过组合所述 n 个线圈的所述输出获得的信号的信噪比 (SNR) 的贡献来表示, 并且每个预先组合器被配置为对来自所述 n' 个子阵列中的各自的一个的输出进行预先组合, 以获得所述 n' 个预先组合输出中的一个;

将所述 n' 个预先组合器的所述 n' 个预先组合输出压缩到具有最高信噪比 (SNR) 的较少的虚拟输出中以用于图像重建。

2. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中, 所述 n 个线圈通过以下被分组到所述 n' 个子阵列中:

以所述重要性从最高到最低对所述 n 个线圈进行排序;

分别将所述 n 个线圈中的第一 n' 个线圈分配到所述 n' 个子阵列中; 并且

重复对其余 $n-n'$ 个线圈的分配, 直至所有 n 个线圈都被分配。

3. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中, 所述子阵列和用于所述子阵列的预先组合系数通过以下来确定:

构建 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M , 所述 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M 将从所述阵列的所述线圈输出的信号 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ 转换为转换输出 $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_n)^T$, $s' = Ms$, 其中, T 表示矩阵转置操作;

选择所述通道转换矩阵 M 的对应于具有最高信噪比 (SNR) 的多个转换输出的行; 并且

优化所述预先组合系数或所述分组和所述预先组合系数两者, 使得所述预先组合系数跨越这样的空间, 所述空间近似由 M 的所有的行或所选择的行跨越的空间。

4. 根据权利要求 3 所述的方法, 其中, 所述通道转换矩阵是白化矩阵。

5. 一种用于磁共振成像 (MRI) 的通道压缩的装置, 所述装置包括转换器, 所述装置还包括:

n' 个预先组合器, 其被配置为对来自被配置用于对同一感兴趣区域 (ROI) 进行成像的 n 线圈阵列的 n 个线圈的 n 个输出 C_1, C_2, \dots, C_n 进行预先组合, 以获得较少的 n' 个预先组合输出, 其中, n' 是大于 1 的整数, 其中, 所述 n 个线圈基于所述 n 个线圈中的每个的重要性的顺序而被分组到 n' 个子阵列中, 所述重要性由所述线圈的所述输出对通过组合所述 n 个线圈的所述输出获得的信号的信噪比 (SNR) 的贡献来表示, 并且每个预先组合器被配置为对来自所述 n' 个子阵列中的一个的输出进行预先组合, 以获得所述 n' 个预先组合输出中的一个,

其中, 所述转换器被耦合到所述 n' 个预先组合器并被配置为将所述 n' 个预先组合输出压缩到具有最高信噪比 (SNR) 的较少的虚拟输出中以用于图像重建。

6. 根据权利要求 5 所述的装置, 其中, 所述线圈通过以下被分组到子阵列中:

以所述重要性从最高到最低对所述 n 个线圈进行排序;

分别将所述 n 个线圈中的第一 n' 个线圈分配到所述 n' 个子阵列中; 并且

重复对其余 $n-n'$ 个线圈的分配, 直至所有 n 个线圈都被分配。

7. 根据权利要求 5 所述的装置, 其中, 所述子阵列和用于所述子阵列的预先组合系数通过以下来确定:

构建 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M ,所述 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M 将从所述阵列的所述线圈输出的信号 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ 转换为转换输出 $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_n)^T$, $s' = Ms$,其中, T 表示矩阵转置操作;

选择所述通道转换矩阵 M 的对应于具有最高信噪比(SNR)的多个转换输出的行;并且

优化所述预先组合系数或所述分组和所述预先组合系数两者,使得所述预先组合系数跨越这样的空间,所述空间近似由 M 的所有的行或所选择的行跨越的空间。

8. 根据权利要求7所述的装置,其中,所述通道转换矩阵是白化矩阵。

9. 根据权利要求5所述的装置,其中,所述转换器还包括:

多个分离器,其被配置为将所述 n' 个预先组合输出中的每个分成多个输出副本;

多个组合器,其被耦合到所述分离器并被配置为将所分离的输出副本组合为虚拟输出,其中,每个组合器由这样的一组复数组合系数来表征,所述一组复数组合系数的幅度表示幅度权重,并且所述一组复数组合系数的角度表示相移。

用于硬件RF接收器通道减少的方法和装置

技术领域

[0001] 本发明涉及用于磁共振成像 (MRI) 的线圈压缩, 并且具体涉及用于使用硬件线圈压缩器的线圈压缩的方法和装置。

背景技术

[0002] 磁共振成像 (MRI)、核磁共振成像 (NMRI)、或磁共振断层摄影 (MRT) 是在放射学中用于在健康和疾病两方面研究人体的解剖结构和功能的医学成像技术。MRI 是基于核磁共振 (NMR)、波谱技术的原理的, 所述核磁共振 (NMR)、波谱技术被科学家用于获得关于分子的微观化学和物理信息。MRI 扫描器使用强磁场和放射波来产生人体内部的高质量图像。

[0003] 自第一个商业单元在 20 世纪 80 年代被推行以后, MRI 扫描器已经进行了相当多的发展。MRI 系统包括主磁体、梯度线圈、射频 (RF) 线圈和计算机系统。主磁体在要被成像的区周围产生强磁场 B_0 。梯度线圈在 B_0 中沿 X、Y 和 Z 方向产生梯度。RF 线圈产生使自旋旋转 90° 、 180° 、或通过脉冲序列选定的任何其他值所需的磁场 B_1 。RF 线圈还检测来自人体内的自旋的信号。计算机系统或成像计算机接收检测到的 RF 信号并重建人体内部的图像。

[0004] 使用具有许多 RF 线圈元件的接收器阵列的 MRI 系统提供具有高信噪比 (SNR)、并行成像加速、或它们两者的图像。日益增长的 RF 线圈元件的数量导致日益增长的接收器通道或信号通道的数量、日益增长的重建中的数据 and 计算的量。然而, 由于复杂性和成本考虑, 商业成像计算机一般具有有限的 4 个输入部, 每个输入部针对一个通道。这意味着可以为例如 32 个的信号通道的数量必须在信号能够被输入到商业成像计算机内之前被减少或被压缩为 4 个。

[0005] 用于线圈压缩、接收器通道减少或 MRI 数据压缩的技术可以用于将来自许多通道的数据压缩到较少的虚拟通道中。例如, 提供 16 个接收器通道或信号通道的典型 16 个线圈元件系统可以使用 16 组组合系数被线性地组合, 以产生 16 个虚拟通道。16 组组合系数构成转换矩阵。如果转换矩阵被很好地选取, 则 16 个虚拟通道包含被包含在原始 16 个接收器通道中的所有信息, 并且具有最高 SNR 的虚拟通道可以是具有理论上可获得的最高 SNR 的虚拟通道。具有最高 SNR 的 4 个虚拟通道可以被输入到用于图像重建的 4 个通道成像计算机内。

[0006] 线圈压缩可以利用软件压缩器、硬件压缩器、或利用硬件和软件两者实施的压缩器来实现。硬件压缩器提供快速的压缩。软件压缩器提供灵活性。硬件压缩器和软件压缩器可以针对可行性、成像质量、成本有效性、简单性等进行选择或充分地进行组合。

[0007] 硬件压缩器包括巴特勒矩阵 (King S, Varosi S, Duensing G., Optimum SNR data compression in hardware using an eigencoil array, MagnReson Med, 2010 年, 第 63 卷, 第 1346-1356 页)、TIM (“Mode Matrix-A Generalized Signal Combiner for Parallel Imaging Arrays” (ISMRM, 2004 年, 第 1587 页) 和软件压缩的直接实施 (“A generalized analog mode-mixing matrix for channel compression in receive arrays”, ISMRM, 2009 年, 第 101 页)。然而, 巴特勒矩阵和 TIM 仅可应用于特定的线圈构造。巴特勒矩阵仅可应用于圆柱形线圈阵列, 并且它不足以用于线性阵列或法向表面线圈阵列。TIM 仅可应用于线

性线圈阵列(例如,脊柱和躯干线圈阵列),并且压缩比被限制于3:1。软件压缩的直接实施太复杂。利用硬件直接实施软件线圈压缩的32:8转换矩阵不受限于线圈阵列的构造,并且不被限制于3:1的压缩比,但是压缩器硬件利用太多硬件部件来进行构建,并且因此太复杂并且对于商业产品来说是成本低效的。

[0008] Wald等人的US20100289494A1公开了一种包括模式混合装置的基于硬件的压缩。所述模式混合装置包括多个分离器、多个组合器和多个路径,以压缩采集的多通道MR信号,从而产生压缩的多通道MR信号。基于硬件的压缩能够利用各种各样的阵列线圈来实现。2007年6月1日的Magnetic Resonance in Medicine中的公布文件“Array compression for MRI with large coil arrays”公开了使用相对于主成分分析(PCA)方法的最优组合的阵列压缩,所述阵列压缩得到相对均匀的虚拟灵敏度。2008年1月1日的Magnetic Resonance in Medicine中的另一公布文件“a software channel compression technique for faster reconstruction with many channels”介绍了用于通道压缩的基于PCA的方法,所述方法不需要对灵敏度图、噪声相关性或任何其他之前信息的计算。Akao等人的US2007013375A1公开了减少在从M个通道信号到更低数量的通道信号的并行重建中采用的通道的数量的方法和装置。重建的通道模式的最优选择能够是将之前的视图信息和/或灵敏度数据用于给定切片的模式。W02014024114公开了一种数据传输电路,所述数据传输电路包括至少一个组合器,所至少一个组合器将复数输入信号组合成具有中等频率的电模拟组合器信号,从而提供允许减少布线需求、增加多个线圈接收器系统的可扩展性以及维持高SNR的紧凑集成系统。

[0009] 随着线圈数量日益增长,需要提供高质量成像并且简单且成本有效的压缩技术。

发明内容

[0010] 公开了用于硬件线圈压缩的方法和装置。被配置用于同一感兴趣区域(ROI)的阵列中的线圈被分组到子阵列中。每个子阵列的线圈在进一步压缩之前利用硬件组合器进行预先组合。包括预先组合器的预先组合转换器是灵活的,即,可应用于例如非圆柱形线圈;比软件压缩算法的直接实施更简单;并且在商业上可行。

[0011] 例如,对于预先组合,转换矩阵M首先被构建用于被配置用于同一ROI的阵列中的线圈。转换矩阵M针对转换输出进行优化以具有最高质量。线圈基于其重要性而被排序并被分组到子阵列中。预先组合系数针对由预先组合系数跨越的子空间被确定为尽可能靠近由用于排序的线圈的最优转换矩阵M的所有行货最重要的行跨越的空间。利用硬件预先组合器构建的转换器对于商业实施来说是简单且成本有效的,并且具有高性能。

[0012] 作为一个范例,一种用于磁共振成像(MRI)的硬件线圈压缩的方法包括:使用多个硬件预先组合器对来自子阵列的线圈的输出进行预先组合,以获得预先组合输出,针对所述子阵列中的每个有一个预先组合器,其中,所述子阵列是通过对被配置用于对感兴趣区域(ROI)进行成像的阵列的线圈进行分组来获得的。

[0013] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的方法中,所述阵列中的所述线圈是基于所述线圈中的每个的重要性而被分组到所述子阵列中的。

[0014] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的方法中,线圈的所述重要性是由所述线圈的所述输出对通过组合所述线圈的所述输出获得的信号的信噪比(SNR)的贡献来

表示的。

[0015] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的方法中,所述线圈通过以下被分组到所述子阵列中:将具有最高重要性的线圈分配到所述子阵列中,针对每个子阵列有一个线圈;并且重复对其余线圈的分配,直至所有线圈都被分配。

[0016] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的方法中,所述子阵列和用于所述子阵列的预先组合系数通过以下来确定:构建 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M ,所述 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M 将从所述阵列的所述线圈输出的信号 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ 转换为转换输出 $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_n)^T$, $s' = Ms$,其中, T 表示矩阵转置操作;选择所述通道转换矩阵 M 的对应于具有最高信噪比(SNR)的多个转换输出的行;并且优化所述预先组合系数或所述分组和所述预先组合系数两者,使得所述预先组合系数跨越这样的空间,所述空间近似由 M 的所有的行或所选择的行跨越的空间。

[0017] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的方法中,所述通道转换矩阵是最优的通道转换矩阵。

[0018] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的方法中,所述预先组合输出被进一步线性地组合以获得虚拟输出。

[0019] 作为一个范例,一种用于磁共振成像(MRI)的硬件线圈压缩的装置包括:多个硬件预先组合器,所述多个硬件预先组合器中的每个被配置为组合来自多个子阵列中的一个的线圈的输出,其中,所述子阵列是通过对被配置用于对感兴趣区域(ROI)进行成像的阵列的线圈进行分组来获得的。

[0020] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的装置中,所述阵列中的所述线圈基于所述线圈中的每个的重要性被分组到所述子阵列中。

[0021] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的装置中,线圈的所述重要性是由所述线圈的所述输出对通过组合所述线圈的所述输出而获得的信号的信噪比(SNR)的贡献来表示的。

[0022] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的装置中,所述线圈通过以下被分组到所述子阵列中:将具有最高重要性的线圈分配到所述子阵列中,针对每个子阵列有一个线圈;并且重复对其余线圈的分配,直至所有线圈都被分配。

[0023] 作为一个范例,在所述用于MRI的硬件线圈压缩的装置中,所述子阵列和用于所述子阵列的预先组合系数通过以下来确定:构建 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M ,所述 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M 将从所述阵列的所述线圈输出的信号 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ 转换为转换输出 $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_n)^T$, $s' = Ms$,其中, T 表示矩阵转置操作;选择所述通道转换矩阵 M 的对应于具有最高信噪比(SNR)的多个转换输出的行;并且优化所述预先组合系数或所述分组和所述预先组合系数两者,使得所述预先组合系数跨越这样的空间,所述空间近似由 M 的所有的行或所选择的行跨越的空间。

[0024] 作为一个范例,在所述用于硬件线圈压缩的装置中,所述通道转换矩阵是最优的通道转换矩阵。

[0025] 作为一个范例,在所述用于硬件线圈压缩的装置中,所述预先组合输出被进一步线性地组合以获得虚拟输出。

附图说明

[0026] 根据以下详细描述,本发明的实施例的特征和优点将会变得明显,其中:

[0027] 图1图示了将接收器通道转换成虚拟接收器通道的具有分离器和组合器的转换器。

[0028] 图2图示了将接收器通道转换成虚拟接收器通道的具有预先组合器、分离器和组合器的转换器。

[0029] 图3图示了具有将接收器通道组合成组合的接收器通道的预先组合器的降级的转换器。

具体实施方式

[0030] 参考附图,在下文中更加充分地描述该新颖系统、装置和方法的各个方面。然而,教导性公开内容可以以许多不同的方式来实施,并不应当被理解为限制于遍及本公开内容所呈现的特定结构或功能。相反,这些方面被提供为使得本公开内容将会是详尽且完整的,并且将会充分地向本领域技术人员传达本公开内容的范围。基于本文中的教导,本领域技术人员应当认识到本公开内容的范围旨在覆盖本文中公开的新颖系统、装置和方法的任一个方面,不管是独立于本发明的任何其他方面被实施还是与本发明的任何其他方面进行组合。例如,使用本文中阐述的任何数量的方面可以实施装置或实行方法。另外,本发明的范围旨在覆盖使用除本文中阐述的本发明的各个方面之外的其他结构、功能、或结构和功能来实行的这样的装置或方法。应当理解,本文中公开的任一个方面都可以通过权利要求中的一个或多个元素来实施。

[0031] 词语“示范性”在本文中用于意指“充当范例、实例、或图示”。在本文中被描述为“示范性”的任一个方面都不必被理解为优选于或优于其他方面。

[0032] 尽管在本文中描述了特定方面,但是这些方面的许多变化和排列落入在本公开内容的范围内。尽管提到了优选方面的一些益处和优点,但是本公开内容的范围并不旨在被限制于特定益处、用途、或目的。相反,本公开内容的方面旨在可宽泛地应用于不同的技术、系统构造,其中一些在附图中和在优选方面的以下描述中以范例的方式进行图示。详细描述和附图仅是本公开内容的图示而非限制,本公开内容的范围由权利要求和其等价方案所限定。

[0033] 在MRI系统中,许多线圈可以被放置在感兴趣区域(ROI)周围以改善成像质量。ROI内部的图像可以通过组合针对最优信噪比(SNR)的线圈的输出的一部分或全部来获得。例如,线圈阵列可以被放置在人体的头部周围,另一线圈阵列可以被放置在人体的手臂周围,并且另外的线圈阵列可以被放置在人体的腿部周围。手臂、头部和腿部是三个ROI,并且三个阵列被放置用于重建人体的三个区域的图像。三个阵列可以提供三倍的并行成像加速。每个阵列的线圈的输出可以被输入到成像计算机并在成像计算机中进行组合以增加图像的SNR。然而,商业成像计算机的输入的数量被限制于例如4个通道。用于ROI的阵列中的线圈元件的数量可以是大的,例如,多达64。它必须被减少或压缩到至多4个通道,并且线圈压缩是必需的。

[0034] 线圈压缩、或接收器通道减少、MRI数据压缩可以用于将来自许多用于ROI的接收器通道的数据压缩成较少的虚拟接收器通道。图1图示了将接收器通道转换成虚拟接收器

通道的具有分离器和组合器的转换器。

[0035] 如在图1中所图示的， n 个线圈 c_1, c_2, \dots, c_n 针对ROI进行部署。 n 个线圈中的每个在成像的过程中输出信号，并且 n 个线圈构成 n 个信号通道或接收器通道。如果例如计算机具有 n 个输入部，则这 n 个信号可以被放大、被数字化并且被输入到计算机内。对ROI的成像可以在计算机中被完成。然而，日益增长的数量 n 可以是大的，例如多达32、64、128、或甚至更大，而商业成像计算机的输入部的数量会由于成本原因而被限制于仅4个。因此，信号组合、信号压缩、通道压缩、或线圈压缩会是不可避免的，这些项目在与最高质量（例如，最高SNR）的组合之后选择信号。

[0036] 作为用于通道压缩的一般模型，图1图示了由 n 个组合器跟随的 n 个分离器。分离器中的每个提供来自 n 个线圈中的一个的信号输出的 n 个副本。来自 n 个分离器的输出然后可以与组合器进行组合，以产生一个组合输出。总共可以存在 n 个组合器和 n 个组合输出。对于 n 个线圈可以存在多达 n 个线性独立的组合输出。

[0037] 组合器中的每个可以由一组复数组合系数来表征。该组合实际上是使用复数组合系数作为权重的线性组合。组合系数的幅度表示幅度权重，并且组合系数的角度或辐角表示被添加到信号通道的相移。最优的线性组合可以产生与最高信号质量或最高信号SNR的组合。分离器、组合器、以及分离器与组合器之间的移相器和衰减器构成转换器。

[0038] 在图1中图示的转换器可以利用软件部件，硬件部件、或它们两者的组合来实施。利用硬件部件实施的转换器提供快速的压缩。利用软件部件实施的转换器提供灵活性。硬件部件和软件部件可以针对可行性、成像质量、成本有效性、简单性等进行选择或充分地进行组合。

[0039] 对于硬件实施方式，在图1中图示的并且被配置用于同一ROI的 n 个线圈中的每个的输出首先利用低噪声放大器(LNA)被预先放大，并且LNA的输出可以利用移相器和衰减器来进行调整，并且然后被连接到硬件分离器。硬件分离器将预先放大的、移相的且幅度衰减的信号分组成多个副本。在分离器为硬件分离器的情况下，除了简单复制外还会存在分离损失。分离的信号然后利用一组移相器和衰减器进行调整，并且使用硬件组合器被组合成虚拟接收器通道。不同的虚拟接收器通道可以利用不同组的移相器和衰减器来获得。分离器、组合器、以及分离器与组合器之间的移相器和衰减器构成转换器。除了线圈与分离器之间的移相器和衰减器外，可以存在多达 n 个分离器、 $n \times n$ 个移相器和衰减器、以及 n 个组合器以用于线性独立的 n 个组合输出。

[0040] 对于软件实施方式，在图1中图示的组合器表示加权的添加或线性组合。在图1中图示的分离器表示简单的复制操作。移相器和衰减器表示复数组合系数。在数字处理之前，A/D转换是必需的。

[0041] 一般来说，包括 n 个分离器、 $n \times n$ 个移相器和衰减器、以及 n 个组合器的转换器可以被表达为 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M ，所述 $n \times n$ 的通道转换矩阵 M 将从阵列的 n 个线圈输出的信号 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ 转换为转换输出 $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_n)^T$ 。转换可以被表达为以下等式：

$$[0042] \quad s' = Ms \quad (1)$$

[0043] 或

$$[0044] \quad \begin{pmatrix} s'_1 \\ s'_2 \\ \vdots \\ s'_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ & & \ddots & \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

[0045] 其中, s_i 是从第 i 个线圈 c_i 输出的信号; $i=1, 2, \dots, n$; n 是用于同一 ROI 的线圈的数量; 并且 T 表示转置操作。

[0046] 不同的转换器或不同的转换矩阵 M 可以得到不同组的转换输出 s' 。最优的转换矩阵 M 可以得到最优的转换输出 s' 。例如, 转换矩阵 M 可以被选取或被优化, 以产生具有最高信号质量的转换的输出或转换输出 s'_1, s'_2, \dots, s'_n 。更具体地, 转换矩阵 M 可以被选取或被优化, 以产生具有最高 SNR 的转换输出 s'_1, s'_2, \dots, s'_n 。利用转换矩阵 M 和转换输出 s'_1, s'_2, \dots, s'_n , n 个转换输出中的具有最好质量或最大 SNR 的部分可以被选取以用于成像计算机中的成像。例如, n 个转换输出中的具有最大 SNR 的 4 个可以被选取并被输入到 4 个通道成像计算机内。例如, 如果转换输出 s'_1, s'_2, \dots, s'_n 以从最高到最低的质量进行排序, 则具有最高质量的 s'_1, s'_2, s'_3, s'_4 可以被选取。线圈压缩、接收器通道减少或 MRI 数据压缩、信号压缩、通道压缩可以通过仅选取 n 个转换输出的一部分 (例如, n 个转换输出中的 m 个) 来实现。实际上, 仅所选取的转换输出需要被输入到成像计算机内以用于进一步处理。在这种情况下, 组合的数量为 m 个, 并且在组合之前紧接着的移相器和衰减器的数量可以从 $n \times n$ 被减少至 $m \times n$, 其中, $m < n$ 。

[0047] 例如, 提供 16 个接收器通道或信号通道的典型的 16 个线圈元件系统可以通过使用 16 组组合系数被线性地组合来产生 16 个虚拟通道。16 组组合系数构成转换矩阵 M 。如果转换矩阵被很好地选取, 则 16 个虚拟通道包含被包含在原始的 16 个接收器通道中的所有信息, 并且具有最高 SNR 的虚拟通道可以是具有理论上可获得的最高 SNR 的虚拟通道。具有最高 SNR 的 4 个虚拟通道可以被输入到用于图像重建的 4 个通道成像计算机内。在这种情况下, 组合的数量为 4 个, 并且在组合之前紧接着的移相器和衰减器的数量可以从 16×16 被减少至 4×16 。然而, 组合的数量以及移相器和衰减器的数量对于商业实施来说仍然太大。

[0048] 在利用软件实施转换的情况下, 当 n 大的时候, 用于组合的计算对于计算机来说是重负荷的, 并且 n 个模数 (A/D) 转换器必须在 n 个通道的预先放大之后且在 n 个数据通道被数字地处理之前被使用。在利用硬件实施转换的情况下, 用于组合的计算被消除。仅 m 个 A/D 转换器必须在通道压缩之后且在数字处理之前或在压缩的 m 个数据通道被输入到成像计算机内之前被使用。然而, 要求至少 $m \times n$ 个移相器和衰减器, 当 n 大的时候, 这是太大的数量并且难以被商业地实施。

[0049] 针对接收器通道的进一步压缩已经做出了许多努力。例如, 如上面所提到的, 硬件线圈压缩方法是基于巴特勒矩阵的。然而, 它仅可应用于圆柱形线圈阵列, 这使得它不足以用于线性阵列或法向表面线圈阵列。TIM 方法也被开发, 但是它仅可应用于线性线圈阵列 (例如, 脊柱和躯干线圈阵列), 并且其压缩比被限制于不超过 3:1。提供 32:8 转换矩阵的另一方法利用硬件直接实施软件线圈压缩算法, 并不遭受上面提到的 2 个缺点。然而, 它要求许多压缩硬件, 这使得它不足以用于商业实施。用于通道压缩的具有预先组合的新颖转换器可以用于解决在图 2 和图 3 中图示的上述问题。

[0050] 图 2 图示了具有在图 1 中的转换器的通道压缩之前的预先组合的新颖转换器。图 3

图示了降级的转换器。如在图2中所图示的,一组n个线圈 c_1, c_2, \dots, c_n 被配置用于同一ROI。尽管它们在图2中被示为线性阵列,但是它们也可以以任何其他的方式被部署。唯一限制是它们针对同一ROI进行部署。阵列中的n个线圈被分组到 n' 个子阵列中。对于每个子阵列,子阵列中的所有线圈的输出都利用预先组合器进行预先组合,并且一个预先组合输出被产生。以此方式,n个通道被减少或被压缩成 n' 个通道。预先组合器可以是软件组合器或硬件组合器。利用硬件预先组合器构建的转换器对于商业实施是简单且成本有效的。

[0051] 在数学上, $n' \times n$ 的预先组合矩阵V可以被构建,所述 $n' \times n$ 的预先组合矩阵V将从阵列的线圈 c_1, c_2, \dots, c_n 输出的信号 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ 转换为预先组合输出 $s'' = (s''_1, s''_2, \dots, s''_{n'})^T$:

$$[0052] \quad s'' = Vs \quad (3)$$

[0053] 在预先组合矩阵V的每一列中,仅一个元素为非零。

$$[0054] \quad V = \begin{pmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1d_1} & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & v_{21} & \cdots & v_{2d_2} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & v_{n'1} & \cdots & v_{n'd_{n'}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

[0055] 上面示出的预先组合矩阵V仅是指示子阵列分别由 $d_1, d_2, \dots, d_{n'}$ 线圈组成的范例,其中, $d_1 + d_2 + \dots + d_{n'} = n$,并且每个子阵列的线圈是阵列中相邻的线圈。在子阵列的线圈不是阵列中相邻的线圈的情况下,预先组合矩阵V看起来与上面示出的不同,但是可以看起来类似于上面示出的在线性变换之后的预先组合矩阵V。该变换等价于对线圈进行重新编号而不改变物理部署。

[0056] 为了产生ROI的最佳图像的目的,分组和预先组合可以是基于线圈中的每个的重要性的。线圈中的每个的重要性可以由线圈的输出对通过组合线圈获得的信号的信噪比(SNR)的贡献来表示。

[0057] 线圈阵列可以以许多方式被分组成子组。例如,通过将具有最高重要性的线圈分配到子阵列内,针对每个子阵列有一个线圈,并且通过重复对其余线圈的分配直至所有线圈都被分配,线圈可以被分组到子阵列中。

[0058] 更具体地,但不失去一般性,线圈 c_1, c_2, \dots, c_n 被假设为从最重要到最不重要进行排序。例如,线圈 c_1 是最重要的,而 c_n 是最不重要的。在这种情况下, c_1 被分配给子阵列1, c_2 被分配给子阵列2, $\dots, c_{n'}$ 被分配给子阵列 n' 。其余线圈 $c_{n'+1}, c_{n'+2}, \dots, c_{2n'}$ 分别以相同的方式被分配给子阵列1,2, \dots, n' 。亦即, $c_{n'+1}$ 被分配给子阵列1, $c_{n'+2}$ 被分配给子阵列2, $\dots, c_{2n'}$ 被分配给子阵列 n' 。其余线圈 $c_{2n'+1}, c_{2n'+2}, \dots, c_n$ 再次以相同的方式被分配给子阵列1,2, \dots, n' 。该过程被重复,直至所有线圈都被分配给子阵列。

[0059] 可以存在对用于同一ROI的阵列中的线圈进行分组的许多其他方式。例如,最重要的k个线圈 c_1, c_2, \dots, c_k 被分配给子阵列1,其余 $n-k$ 个线圈中的最重要的k线圈 $c_{k+1}, c_{k+2}, \dots, c_{k+k}$ 被分配给子阵列2,等等。作为一范例, $k = n \setminus n' + 1$ 。“ $n \setminus n'$ ”表示小于 n/n' 的最大整数。线圈也可以通过将 c_1 和 c_n 分配给子阵列1、将 c_2 和 c_{n-1} 分配给子阵列2等来进行分组。

[0060] 子阵列和用于该子阵列的预先组合系数可以备选地通过以下来确定:构建 $n \times n$ 的通道转换矩阵M,所述 $n \times n$ 的通道转换矩阵M将从阵列的线圈输出的信号 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$

转换为转换输出 $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_n)^T$, $s' = Ms$; 选择对应于具有最高SNR的转换输出的数量的通道转换矩阵M的行; 并且优化预先组合系数或分组和预先组合系数两者, 使得预先组合系数跨越这样的空间, 所述空间近似由M的所选择的行或M的所有行跨越的空间。由矩阵跨越的空间指的是通过矩阵的行向量和列向量的线性组合获得的空间。具有最大重要性(例如, 具有最大SNR)的转换输出 s'_1, s'_2, \dots, s'_m 可以被选择。

[0061] 另一 $n' \times n'$ 的通道转换矩阵 M' 可以用于如在图2中示出的那样将预先组合输出 $s'' = (s''_1, s''_2, \dots, s''_{n'})^T$ 转换为转换输出 $s''' = (s'''_1, s'''_2, \dots, s'''_{n'})^T$:

$$[0062] \quad s''' = M' s'' = M' V s \quad (5)$$

[0063] 预先组合矩阵V可以为使得 n' 个转换输出的线性组合: $(a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{n'}) s'' = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{n'}) V s$ 近似第一 n' 个转换输出 $(b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n'} \ 0 \ \dots \ 0) M s$ 的线性组合, 或者16元素行矩阵 $(a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{n'}) V$ 的空间近似16元素行矩阵 $(b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n'} \ 0 \ \dots \ 0) M$ 或16元素行矩阵 $(b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n'} \ b_{n'+1} \ \dots \ b_n) M$ 的空间。其中, $a_i, i=1, \dots, n'$ 并且 $b_i, i=1, \dots, n$ 是任意复数。

[0064] 优化可以被更详细地表达为如下:

$$[0065] \quad (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{n'}) \begin{pmatrix} v_{11} & \dots & v_{1d_1} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & v_{21} & \dots & v_{2d_2} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & v_{n'1} & \dots & v_{n'd_{n'}} \end{pmatrix}$$

$$= (a_1 v_{11} \ \dots \ a_1 v_{d_1} \ a_2 v_{21} \ \dots \ a_2 v_{2d_2} \ \dots \ a_{n'} v_{n'1} \ \dots \ a_{n'} v_{n'd_{n'}})$$

[0066] 近似

$$[0067] \quad (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n'} \ 0 \ \dots \ 0) \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{pmatrix}$$

$$= \left(\sum_{i=1, n'} b_i m_{i1} \quad \sum_{i=1, n'} b_i m_{i2} \quad \dots \quad \sum_{i=1, n'} b_i m_{in} \right),$$

[0068] 或

$$[0069] \quad (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n'} \ b_{n'+1} \ \dots \ b_n) \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{pmatrix}$$

$$= \left(\sum_{i=1, n} b_i m_{i1} \quad \sum_{i=1, n} b_i m_{i2} \quad \dots \quad \sum_{i=1, n} b_i m_{in} \right)$$

[0070] 通道转换矩阵M可以被选择为理论上最优的通道转换矩阵。软件压缩方法可以用于获得理论上最优的通道转换矩阵M。例如, 理论上最优的通道转换矩阵M是白化矩阵。然后, 线圈阵列中的阵列元素可以基于最优的通道转换矩阵M而被分组到子阵列中。

[0071] 采用16元素线圈阵列作为范例, 16×16 的通道转换矩阵M可以被构建, 所述 16×16 的通道转换矩阵M将从阵列的16个线圈 c_1, c_2, \dots, c_{16} 输出的信号 $s = (s_1, s_2, \dots, s_{16})^T$ 转换为

转换输出 $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_{16})^T$ 。其行对应于新的虚拟通道。我们有 $s' = Ms$ 和 $M = (M_{1 \times 16}^1 \ M_{1 \times 16}^2 \ \dots \ M_{1 \times 16}^{16})^T$, M^i 是 M 的第 i 个行, 并且对应的协方差矩阵是信号 $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_{16})^T$ 的 $C_{16 \times 16}$, 其中, 作为 C_1, C_2, \dots, C_{16} 的其对角分量分别表示针对虚拟通道的 SNR。矩阵 M 被布置为使得协方差矩阵的对角分量呈以递减顺序。以此方式, C_1 对应于具有最大 SNR 的虚拟通道, 而 C_{16} 对应于具有最小 SNR 的虚拟通道。

[0072] 使用硬件来直接实施 M , 具有最大 SNR 的四个虚拟通道 (即, 在 16:4 压缩的情况下, M^1 至 M^4) 将会利用硬件来直接实施, 得到十六个 1 到 4 的功率分离器、4 个 16 到 1 的功率组合器、以及 64 个移相器和衰减器。硬件转换器对于商业实施来说太复杂。

[0073] 使用预先组合的方法, 阵列的 16 个元素被分组到 4 个子阵列中, 每个子阵列具有 4 个元素。对于预先组合来说存在 16 个输入通道和 4 个输出通道。对于分组, M 的第一 4 行 (M^1 至 M^4) 例如被用于确定应当如何实施分组。执行分析以计算出最重要和最不重要的线圈阵列元素, 并且然后 16 个线圈元件以其重要性分等级并且进行排序。16 个元素基于重要性的顺序而被分组到 4 个子阵列中。

[0074] 在 16 个线圈元件被分组到 4 个子阵列中之后, 一个 4 输入 1 输出的 RF 硬件预先组合器被用于每个 4 元素子阵列, 因此我们有四个要被确定的预先组合矩阵, 即 $v^1_{1 \times 4}, v^2_{1 \times 4}, v^3_{1 \times 4}, v^4_{1 \times 4}$ 。

$$[0075] \quad s'_1 = v^1(s_1, s_2, s_3, s_4)^T = (v^1_1, v^1_2, v^1_3, v^1_4) \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{pmatrix},$$

$$[0076] \quad s'_2 = v^2(s_5, s_6, s_7, s_8)^T = (v^2_1, v^2_2, v^2_3, v^2_4) \begin{pmatrix} s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \end{pmatrix},$$

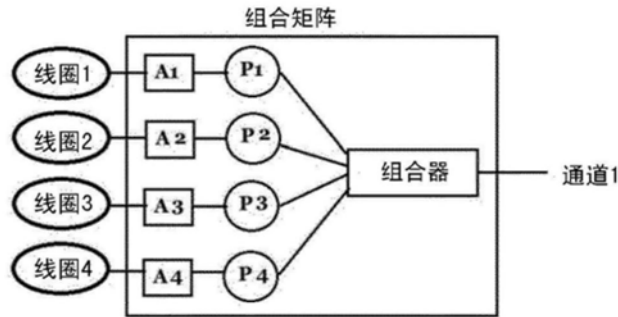
$$[0077] \quad s'_3 = v^3(s_9, s_{10}, s_{11}, s_{12})^T = (v^3_1, v^3_2, v^3_3, v^3_4) \begin{pmatrix} s_9 \\ s_{10} \\ s_{11} \\ s_{12} \end{pmatrix},$$

$$[0078] \quad s'_4 = v^4(s_{13}, s_{14}, s_{15}, s_{16})^T = (v^4_1, v^4_2, v^4_3, v^4_4) \begin{pmatrix} s_{13} \\ s_{14} \\ s_{15} \\ s_{16} \end{pmatrix}。$$

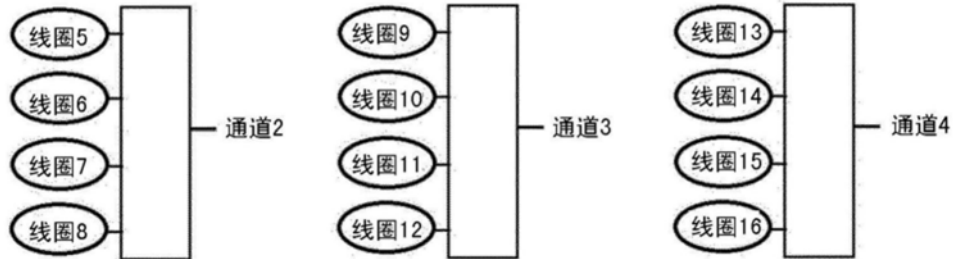
[0079] 四个预先组合矩阵 v^1, v^2, v^3 和 v^4 跨越子空间: $W_{\text{结果}} = (a_1 v^1 \ a_2 v^2 \ a_3 v^3 \ a_4 v^4)$, 其中, a_1, a_2, a_3 和 a_4 是任意的复数。 $W_{\text{结果}}$ 是 16 元素行矩阵的空间。

[0080] 选取子阵列组以及选取 RF 预先组合矩阵 v^1, v^2, v^3 和 v^4 的目标是要构建另一空间 $W_{\text{目标}} = b_1 M^1 + b_2 M^2 + b_3 M^3 + b_4 M^4$ 、或 $W_{\text{目标}} = b_1 M^1 + b_2 M^2 + b_3 M^3 + b_4 M^4 + b_5 M^5 + \dots + b_{16} M^{16}$, 并且 $W_{\text{结果}}$ 应当尽可能地接近 $W_{\text{目标}}$, 其中, $b_1, b_2, b_3, \dots, b_{16}$ 也是任意的复数, 并且 M^i 是如在上面所指示的 M 的第 i 行。

[0081] 预先组合可以在如下图形中进行示出：



[0082]



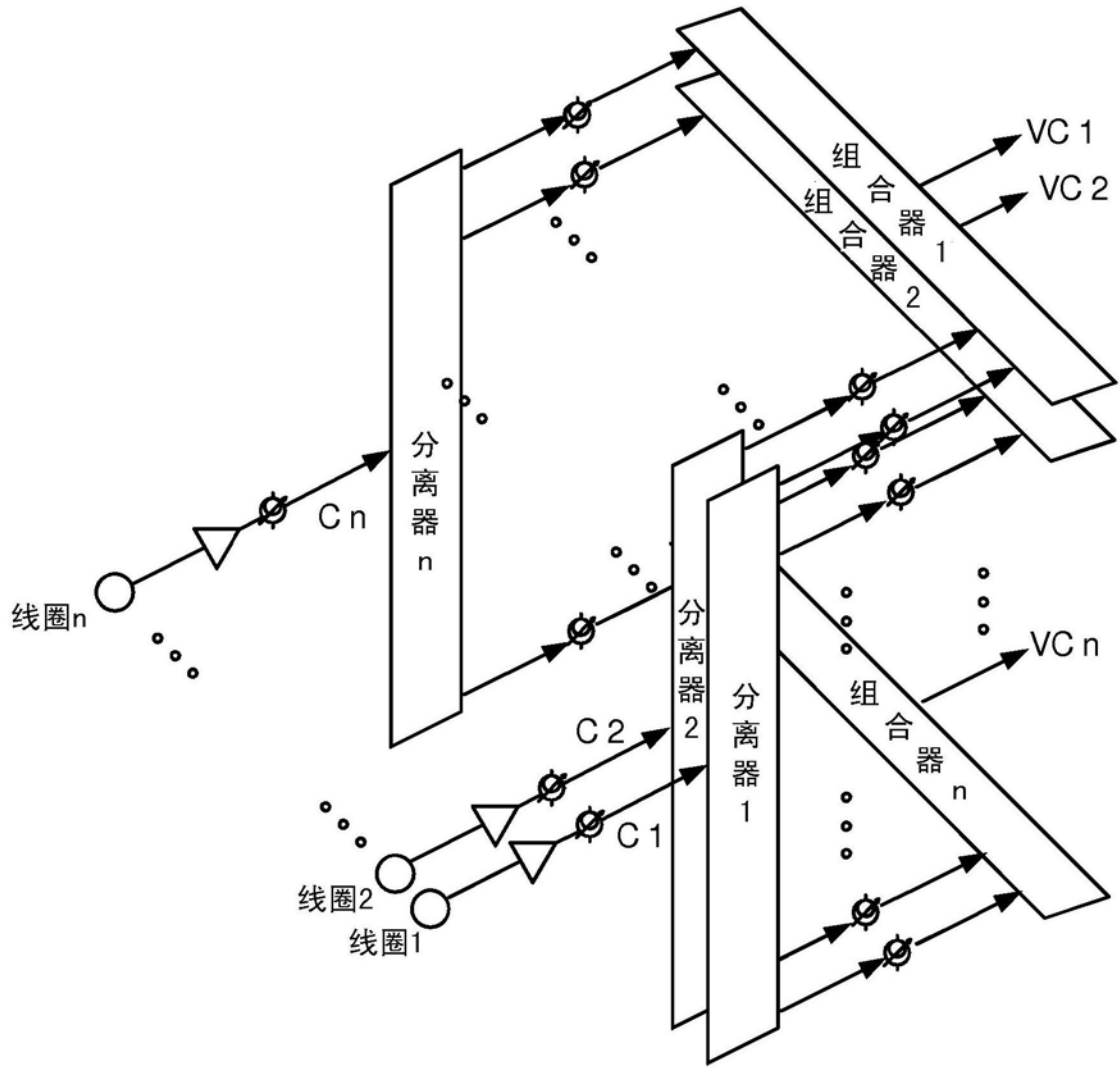
[0083] 用于所提出的方法的一个简单范例可以如下。对于16元素线圈阵列，最优的通道转换矩阵M可以被构建。第一行 $M^1 = (M_1^1, M_2^1, \dots, M_{16}^1) = (m_{1,1}, m_{1,2}, \dots, m_{1,16})$ 可以被挑选出，其表示最重要的虚拟通道。

[0084] 线圈的重要性可以被确定，并且顺序被调整。假设在调整之后16个线圈 c_1, c_2, \dots, c_{16} 以重要性进行排序。即，假设 c_1 是最重要的线圈，而 c_{16} 是最不重要的线圈，并且M表示用于排序的线圈的最优的转换矩阵。

[0085] 16个排序的线圈然后以如下方式被分组到4个子阵列 (c_1, c_5, c_9, c_{13})、(c_2, c_6, c_{10}, c_{14})、(c_3, c_7, c_{11}, c_{15}) 和 (c_4, c_8, c_{12}, c_{16}) 中： c_1, c_2, c_3, c_4 首先分别被分配给子阵列1、2、3和4； c_5, c_6, c_7, c_8 然后是其余线圈中的最重要的线圈并且分别被分配给子阵列1、2、3和4；并且该过程被重复，直至所有线圈都被分配到子阵列中。

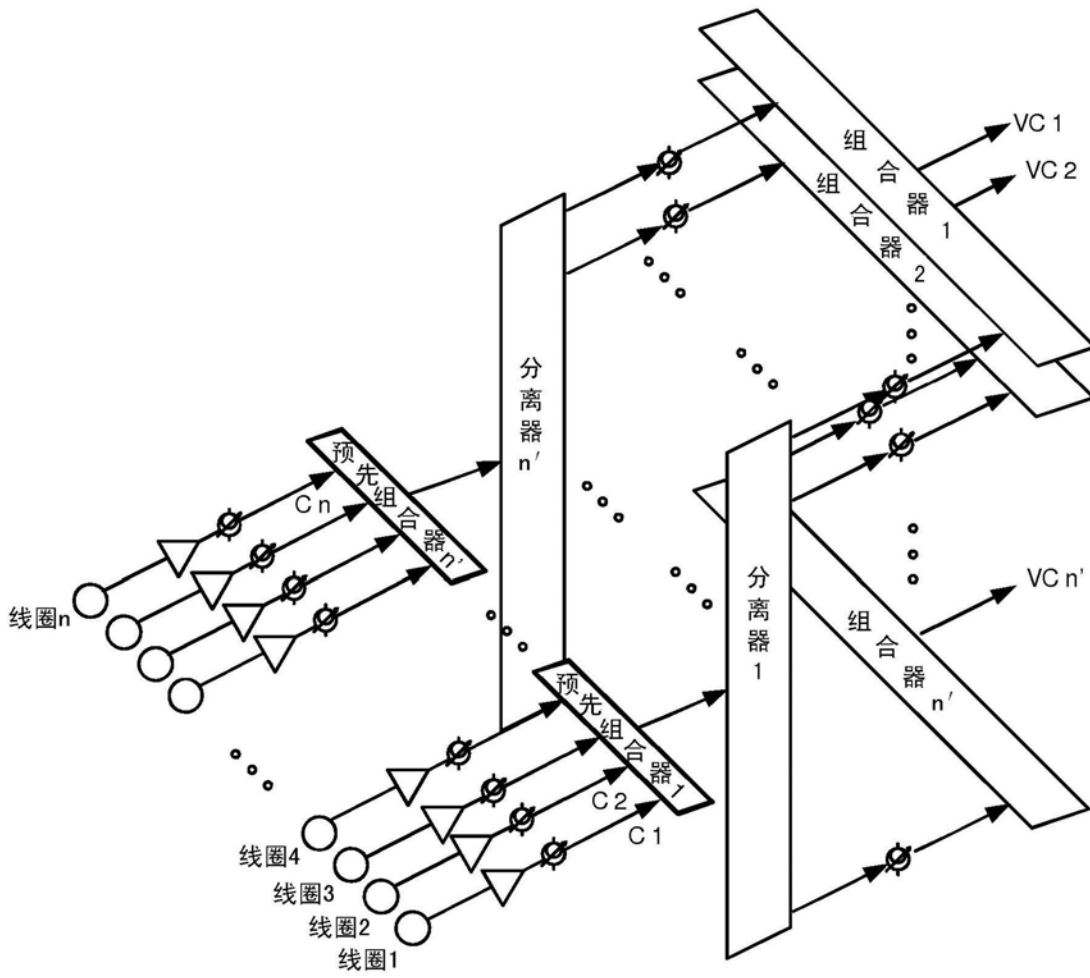
[0086] RF预先组合矩阵 v^1, v^2, v^3 和 v^4 可以针对子空间 $W_{结果}$ 被确定为尽可能地接近 $W_{目标}$ 。

[0087] 简而言之，对于预先组合方法，转换矩阵M首先被构建用于被配置用于同一ROI的阵列中的线圈。转换矩阵M针对转换输出进行优化以具有最高质量。线圈基于其重要性而被排序并被分组到子阵列中。预先组合系数针对由预先组合系数跨越的子空间被确定为尽可能地接近由针对排序的线圈的最优的转换矩阵M的所有行或最重要的行所跨越的空间。利用硬件预先组合器构建的转换器对于商业实施来说是简单且成本有效的，并且具有高性能。



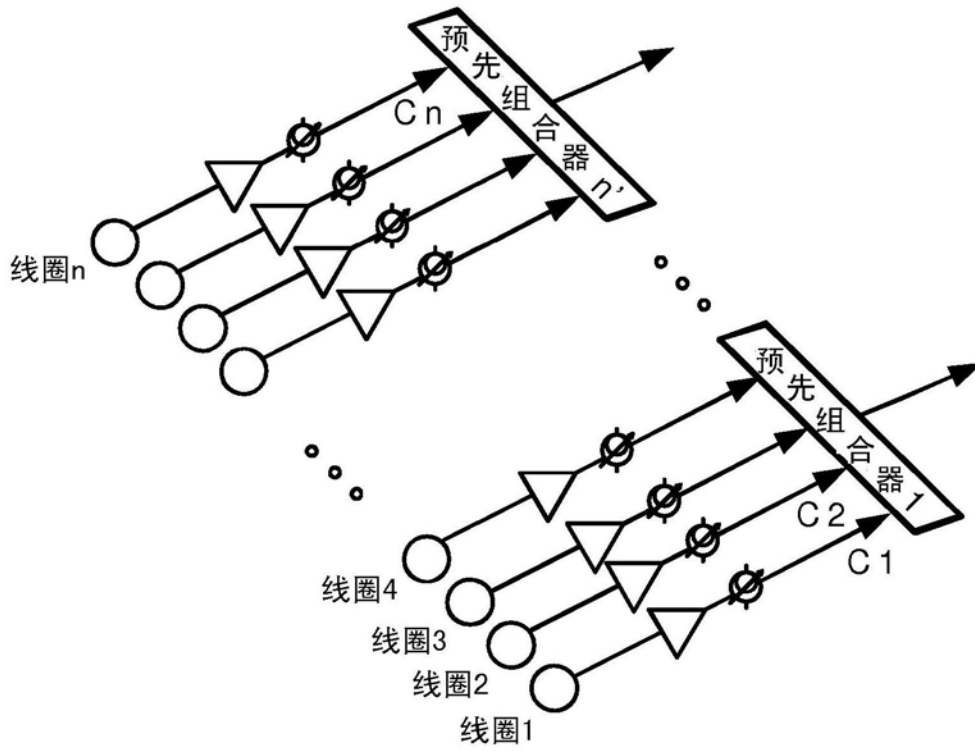
将接收器通道转换成虚拟接收器通道的具有分离器和组合器的转换器

图1



将接收器通道转换成虚拟接收器通道的具有预先组合器、分离器和组合器的转换器

图2



具有将接收器通道组合成组合的接收器通道的预先组合器的降级的转换器

图3