

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01R 33/36 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200880014666.5

[43] 公开日 2010 年 3 月 17 日

[11] 公开号 CN 101675354A

[22] 申请日 2008.4.3

[21] 申请号 200880014666.5

[30] 优先权

[32] 2007.5.4 [33] EP [31] 07107532.9

[86] 国际申请 PCT/IB2008/051253 2008.4.3

[87] 国际公布 WO2008/135872 英 2008.11.13

[85] 进入国家阶段日期 2009.11.3

[71] 申请人 皇家飞利浦电子股份有限公司

地址 荷兰艾恩德霍芬

[72] 发明人 I·格雷斯林 P·韦尔尼科尔

J·H·登伯夫

[74] 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

代理人 王英 刘炳胜

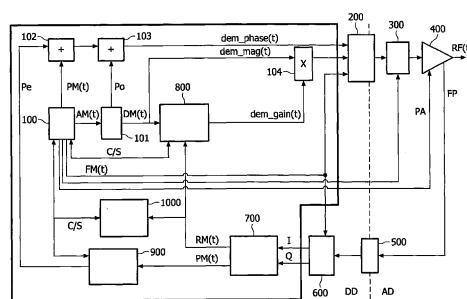
权利要求书 2 页 说明书 13 页 附图 3 页

[54] 发明名称

用于 MRI 的具有数字反馈的 RF 发射器

[57] 摘要

公开了一种用于生成 RF 发射信号的方法和 RF 发射系统，用于对形式为或包括一个或多个天线装置、线圈、线圈元件或线圈阵列的 RF 发射器(14)进行馈送。此外，还公开了一种用于为多个这种 RF 发射器馈送信号的多通道 RF 发射系统，尤其是用作磁共振成像(MRI)系统中用于激励核磁共振(NMR)的 RF 激发系统。在数字域中将需求 RF 发射信号与 RF 发射信号进行比较并借助复合前置补偿器(11)、适配单元(17)和查找表单元(18)针对两者之间的差值或误差进行数字方式校正。



1、一种用于借助于 RF 发射系统生成 RF 发射信号的方法，用于对 RF 发射器进行馈送，包括以下步骤：

- 检测在所述 RF 发射系统的输出或在所述 RF 发射器处生成的 RF 发射信号，
 - 将所检测到的 RF 发射信号转换成数字信号，
 - 评估数字化的检出 RF 发射信号和供应给所述 RF 发射系统或由所述 RF 发射系统生成的需求 RF 信号之间的差值或误差，
 - 以数字方式调整所述需求 RF 信号，从而使所述差值或误差至少最小化或消除，使得所述 RF 发射信号至少基本等于或对应于所述需求信号或与所述需求信号相关联。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其中，以如下各项中的至少一项的形式评估所述数字化的检出 RF 发射信号和所述需求 RF 信号之间的所述差值或误差：信号的电平稳定度、信号的线性度、信号的动态范围、信号的幅度、信号的相位。

3、一种用于根据权利要求 1 所述的生成 RF 发射信号的 RF 发射系统，包括：传感器，用于检测在所述 RF 发射系统的输出或所述 RF 发射器（14）处生成的 RF 发射信号；数模转换器（16），用于将所检测到的 RF 发射信号转换到数字域中；适配单元（17），用于根据由 RF 波形发生器（10）生成的需求 RF 信号和所检测到的 RF 发射信号在数字域中计算所得到的差值或误差；以及复增益前置补偿器（11），用于基于计算出的差值或误差以数字方式调整所述需求 RF 信号，从而使该差值或误差至少最小化或消除。

4、根据权利要求 3 所述的 RF 发射系统，其中，提供查找表单元（18），用于存储查找表，以便根据由所述适配单元（17）计算出的所述差值或误差控制调整所述需求 RF 信号的量。

5、根据权利要求 4 所述的 RF 发射系统，其中，提供所述适配单元(17)，用于以这样的方式更新存储于所述查找表单元（18）中的所述查找表，使所述需求 RF 信号和所述 RF 发射信号之间的所计算出的差值或误差至少最小化或被消除。

6、根据权利要求 3 所述的 RF 发射系统，包括正交调制器（19）和正交解调器（20），所述正交调制器用于将经调整的需求 RF 信号上混频到所述 RF 发射信号的期望的更高频率，所述正交解调器用于在借助所述数模转换器（16）进行数字化之前将所检测到的 RF 发射信号下混频到期望的更低频率。

7、一种用于根据权利要求 1 所述的生成 RF 发射信号的 RF 发射系统，包括：RF 功率放大器（400），用于为 RF 发射器馈送 RF 信号；激活电路，用于向所述 RF 功率放大器提供输入信号；以及控制电路，用于控制所述激活电路，其中，提供所述控制电路以对所述 RF 功率放大器或所述 RF 发射器的输出信号进行采样、以数字方式将所测量到的输出信号与需求信号进行比较，并以数字方式校正提供给所述 RF 功率放大器的所述输入信号。

8、根据权利要求 7 所述的 RF 发射系统，其中，所述控制电路设有前馈功能，用于根据选定的 MR 采集序列预设置所述激活电路。

9、一种磁共振成像系统，包括至少一个根据权利要求 3 所述的 RF 发射系统。

10、一种包括计算机程序代码的计算机程序，当在可编程微型计算机上运行所述程序时，所述计算机程序代码适于执行根据权利要求 1 所述的方法或适于在根据权利要求 1 所述的方法中使用。

用于 MRI 的具有数字反馈的 RF 发射器

技术领域

本发明涉及一种用于生成 RF 发射信号的方法和 RF 发射系统，用于对形式为或包括一个或多个天线装置、线圈、线圈元件或线圈阵列的 RF 发射器进行馈送。此外，本发明涉及一种用于为多个这种 RF 发射器馈送信号的多通道 RF 发射系统，尤其是用作磁共振成像（MRI）系统中用于激励核磁共振（NMR）的 RF 激发系统。本发明还涉及一种包括这种单通道或多通道 RF 发射或激发系统的 MRI 系统。

背景技术

WO 2005/083458 公开了一种“method of effecting nuclear magnetic resonance experiments using Cartesian feedback”以及一种具有多个发射线圈的特定布置，其中每个发射线圈具有其自己独立的发射器和电流探测器，用于将其电流的幅度和相位设置成其要求的值。应当通过如下方式克服或至少改善线圈之间耦合的有害效应：测量线圈中的电流，并将发射器信号输入的已知值与被测电流的幅度和相位值进行比较，确定这些值之间的差值，并利用这一差值重置发射信号输入的幅度和相位，使得线圈中电流的幅度和相位以高精确度等于要求值。

发明内容

已经发现以上方法和布置的缺点是在某种情况和负载条件下可能会发生反馈回路不稳定，且随着要控制的发射线圈数量增大，电路费用迅速增加。此外，由于噪声和部件容限的原因，对于这种反馈回路而言，仅能够获得发射信号有限精度的期望幅度和相位。

更详细地，已经发现，RF 发射系统中包括的 RF 功率放大器的增益可能随时间变化，并且所述增益可能会在发射的 RF 脉冲期间由于放大器部件发热和放大器电源波动而变化。这些变化导致 RF 脉冲输出的变化，通常称

为脉冲过冲和下降。功率放大器的增益也可能同样由于温度和电源状况在 RF 脉冲和 RF 脉冲之间变化。这些效应导致所生成的 RF 场可能从期望的 RF 场偏离，因为不能获得 RF 功率放大器所需的时间响应，因此一般将 RF 发射信号的电平稳定性视为要解决的第一个问题。

此外，大部分 RF 功率放大器具有显著的非线性响应，尤其是对更高输出电平而言，因此 RF 发射信号的线性度是要解决的第二个问题。

要解决的第三个问题是特定放大器的输出信号动态范围，尤其是在生长的低功率和短的大功率 RF 脉冲混合序列的情况下。这样的结果是为了适应所需的 RF 脉冲通常必需要改变电源条件。

对于磁共振成像（MRI）系统而言，这些问题可能会导致 MR 信号性能降低，从而观察到不佳的图像和频谱质量。尤其是由于 RF 发射电平不稳定，可能会发生重影，以及由于 RF 发射的非线性，会观察到空间分辨率损失。

对于用于操作形式为或包括多个 RF 线圈或线圈阵列的多个 RF 发射器，或对于其他多通道 RF 激发系统，所有这些问题都加剧或恶化，因为它们是用于例如 MRI 系统中的。由于通常 RF 发射通道之间为封闭对准，且取决于相关 RF 发射器的实际负载，因此会发生各发射通道及其部件之间的相互耦合效应，使得 RF 发射通道中的信号相位和幅度并非彼此独立，进而各个 RF 发射通道或元件之间交换功率。因此，一个或多个 RF 发射通道的输出处（即 RF 发射器的输入处）的 RF 信号的幅度和/或相位可能会显著偏离施加在相关 RF 发射通道的输入处的信号的需求幅度和/或相位或相对于其变化，使得在 MRI 系统的检查空间中生成的 RF 场可能会相应地偏离期望的 RF 场。

这尤其会在磁场强度较高的那些 MRI 系统中导致问题，在这些系统中所需 RF 发射或激励信号的波长达到检查对象的尺度，导致检查对象之内的电介质谐振或波传播效应以及不均匀的 RF 激励场。为了补偿在 MRI 检查期间这些不希望有的效应影响，必须要例如通过 RF 脉冲的并行发射成像或并行发射并根据已知的像发射 SENSE 的方法（例如，参见 Katscher 等人在 Magnetic Resonances in Medicine (2003) 49: 144-150 中的文章“Trannsmit SENSE”）或 RF 匀场（参见 Ibrahim 等人在 Magnetic Resonance Imaging

(2001)12月19日(10): 1339-47的文章“Effect of RF coil excitation on field inhomogeneity at ultra high fields: a field optimized TEM resonator”), 彼此独立地选择和控制每个RF发射通道的RF发射信号的尤其是幅度和相位。

因此, 基本要求如下: 在这种RF发射系统的发射线圈元件处的RF发射信号要尽可能严格地与通过以上并行发射成像方法计算出的相关需求信号相互关联。

本发明的一个目的是提供用于生成RF发射信号的一种方法和一通道或多通道RF发射系统, 用于给形式为或包括一个或多个天线装置、线圈或线圈阵列的一个或多个RF发射器进行馈送, 使得在至少一个RF发射通道的输出处生成的RF发射信号与供应给RF发射系统的每个通道或由RF发射系统生成的需求信号以高精确度相互关联或完全符合或匹配或至少基本对应。

以上相互关联或完全符合或对应尤其涉及到RF发射信号相对于需求信号的幅度、相位、电平稳定度、线性度和动态范围的至少一个。

与例如在以上WO 2005/083458中披露的现有技术相比, 尤其需要改善以上相互关联或完全符合或对应的程度。

该目的是通过根据权利要求1所述的方法和根据权利要求3所述的RF发射系统实现的。

根据本发明的方法和RF发射系统的一个优点在于, 通过在数字域中实现, 例如对于MRI系统而言, 如果检查对象在暴露于RF激励场的检查空间中运动, 即使在不利或变化的负载条件下, 也能够以较容易和可靠的方式避免反馈回路的不稳定。具体而言, 还考虑到由于患者诸如呼吸运动的运动导致的负载条件的变化。

如果使用实时反馈回路相应地根据期望的RF需求更改RF放大器的输入信号, 或在使用电流源的情况下, 可以显著地减小安全裕度。因此, 在扫描期间, 监测与期望波形的偏离, 以检测是否突破SAR极限或任何不安全状况。选择适当的安全裕度是鲁棒的检测和相关更大“SAR裕度”或更小“SAR裕度”之间的折衷办法, 导致更高的磁化率/对患者运动敏感。根据本发明, 实时反馈回路能够解决患者运动的问题, 因此SAR安全裕度可以是窄的, 同时避免了由于患者运动导致的扫描意外终止。

此外，尤其是对于很多 RF 发射通道而言，根据本发明的 RF 发射系统比在模拟域中实现需要更少的电路成本。

RF 发射系统部件的噪声和容限对以上相关或对应的影响是同样情况，与在模拟域中实现相比，显著减小了或消除了这种影响。

最后，在应用于 MRI 系统中的情况下，根据本发明的方法和 RF 发射系统能够有利地与已知方法结合，以为多个 RF 发射通道的每个计算 RF 发射或激励信号的幅度和相位，以便在检查空间中获得期望的（均匀）RF 激励场，所述方法例如是 RF 匀场或发射 SENSE 方法。

从属权利要求披露了本发明的实施例的优点。

根据权利要求 2 所述的方法披露了被评估和补偿的、检测到的 RF 发射信号和需求 RF 信号之间的差值或误差的优选种类。

利用根据权利要求 4 和 5 所述的 RF 发射系统，可以实时地以高精度非常快地评估需求 RF 信号的所需校正。

利用根据权利要求 6 所述的 RF 发射系统，可以在较低基频带中进行信号处理和校正。

要认识到，可以轻易地以任何组合方式组合本发明的特征而不脱离如所附权利要求界定的发明范围。

根据通过参考附图给出的本发明的优选及示范性实施例的以下描述，本发明的更多细节、特征和优点将变得明白。

附图说明

图 1 示出了根据本发明第一实施例的 RF 发射系统的总体功能框图；

图 2 示出了根据图 1 的 RF 发射系统的量值稳定器的详细功能框图；

图 3 示出了根据图 1 的 RF 发射系统的复数到极坐标转换器的详细功能框图；

图 4 示出了根据本发明第二实施例的 RF 发射系统的功能框图；并且

图 5 示出了根据本发明第三实施例的 RF 发射系统的功能框图。

具体实施方式

一般地，根据本发明，将在 RF 发射系统的输出处生成或在 RF 天线(RF

发射器) 处检测到的 RF 发射信号转换成数字域并在数字域中与供应给 RF 发射系统或由 RF 发射系统生成的原始被请求数字需求信号进行比较。使用数字误差信号校正数字或模拟输入信号, 以在 RF 发射系统的输出处(即 RF 天线的输入处) 获得需要的 RF 发射输出信号, 从而实现数字域中的实时反馈回路。

此外, 可以使用经校准的预补偿来进一步提高性能。

提供在下文中解释的根据本发明的 RF 发射系统的实施例尤其是为了用作磁共振成像系统中的 RF 激发系统, 以借助 MRI 系统的检验区之内的 RF 线圈形式的 RF 发射器生成 RF 激励场。通常, 这种 RF 激发系统包括多个 RF 发射系统(多通道 RF 激发系统), 每个都是如下文所述的形式。

根据本发明的第一实施例, RF 发射系统一般包括: RF 功率放大器, 用于为 RF 发射器馈送 RF 信号; 激活电路, 用于向 RF 功率放大器提供输入信号; 以及控制电路, 用于控制激活电路。控制电路对 RF 功率放大器的(或 RF 发射器的) 输出信号采样, 以数字方式将测量到的输出信号与指定的需求信号比较, 并以数字方式校正提供给 RF 功率放大器的输入或需求信号。

根据该第一实施例的优选变化, 控制电路具有前馈功能, 其根据所选的 MRI 采集序列预先设置激活电路。

通过第一实施例尤其可以实现改善的发射电平稳定性和线性度。此外, 可以通过事先设置到 RF 功率放大器的放大水平来实现 RF 功率电平的更宽范围变化。通过控制电路, 可以实现一定时间间隔之内(通常, 对于采样为 $0.8\mu\text{s}$, 对于校正为 $50\mu\text{s}$) 的输出信号采样和输入信号校正, 该时间间隔小于 RF 发射电平变化的典型时间或小于 MRI 采集序列中 RF 脉冲的重复频率。即使是对 RF 放大器的设置的校正也可以在 RF 脉冲之内执行。

图 1 示出了根据本发明第一实施例的这种 RF 发射系统的总体功能框图。该系统包括时段引擎(stretch engine) 100、量值功能单元 101、第一加法器单元 102 和第二加法器单元 103、乘法器 104、直接数字合成器 200、衰减器 300、RF 功率放大器 400、模拟域 AD 和数字域 DD 之间的模数转换器 500、数字接收机 600、复数到极坐标转换器 700、量值稳定器 800、相位稳定器 900 和功率监测单元 1000。RF 功率放大器 400 生成用于为 RF 线

圈或天线进行馈送的输出信号 RF (t)，RF 功率放大器 400 包括用于发送功率的允许输入 PA 和输出 FP。

时段引擎 100 充当计算机上运行的软件和实时控制 MR 硬件之间的接口。软件为下一时段（一段时间）确定必要的硬件控制设置而时段引擎 100 为当前时段控制硬件。因此，在每个时段中，时段引擎 100 利用软件预加载的设置对硬件进行时间控制。

在这些设置中有 RF 脉冲 RF (t) 请求或需求的设置（要馈送到 RF 天线的输出脉冲或 RF 发射信号），例如量值、相位和载波频率。通常，每几个微秒设置一次这些设置，以允许生成具有期望光谱响应的 RF 脉冲 RF(t)。直接数字合成器 200 包括三个实时可控输入，即用于 RF 脉冲 RF (t) 的幅度的第一输入，用于 RF 脉冲 RF (t) 的相位的第二输入以及用于 RF 脉冲 RF (t) 的载波频率的第三输入。

时段引擎 100 每几个微秒输出被请求或需求的幅度波形 AM (t)、被请求或需求的相位波形 PM (t) 和被请求或需求的载波频率波形 FM (t) 的样本。由量值功能单元 101 将幅度样本 AM (t) 转换成量值样本 DM (t) 和相位偏移值 Po。对于负幅度样本，相位偏移值 Po 为 180°，对于其他，为 0°。

第一加法器单元 102 生成输出信号，该输出信号是由时段引擎 100 生成的被请求或需求相位波形样本 PM (t) 和相位稳定器 900 生成的相位误差信号 Pe 之和。

第二加法器单元 103 将相位偏移值 Po 加到第一加法器单元 102 的输出信号上，生成供应给直接数字合成器 200 的第一输入的和输出信号（需求或请求的相位信号 dem_phase (t))。

将被请求或需求的量值样本信号 dem_mag (t)（或 DM (t)）施加到乘法器 104 的第一输入和量值稳定器 800，量值稳定器 800 借助于其用于被请求量值增益的输出信号 dem_gain(t) 控制乘法器 104 的第二输入，从而能够控制施加到直接数字合成器 200 的第二输入（量值输入）的被请求或需求的量值水平。

将被请求或需求的载波频率样本信号 FM (t) 施加到直接数字合成器 200 的第三输入和数字接收机 600。

将直接数字合成器 200 的 RF 输出信号施加到衰减器 300 的输入，其用于借助时段引擎 100 对期望的 RF 发射信号 $RF(t)$ 进行粗水平设置。

将衰减器 300 的输出信号供应给 RF 功率放大器 400，以生成要馈送到 RF 天线的 RF 发射信号 $RF(t)$ 。通过由时段引擎 100 生成的允许信号 PA 启动 RF 功率放大器 400。将 RF 功率放大器 400 输出处的发送功率 FP 馈送到模数转换器 500，其输出与数字接收机 600 相连，用于生成复数基带信号 I 和 Q，将复数基带信号提供给复数到极坐标转换器 700，用于生成被接收的量值信号 $RM(t)$ 和被接收的相位信号 $PM(t)$ ，将量值信号提供给量值稳定器 800 和功率监测单元 1000，将相位信号提供给相位稳定器 900。

时段引擎 100 经由 C/S 接口控制量值稳定器 800、相位稳定器 900 和功率监测单元 1000。

还可以通过控制量值稳定器 800 进行精细电平设置。

图 2 示出了根据图 1 的电路布置的该量值稳定器 800 的详细功能框图。其包括脉冲开始检测功能单元 801、延迟功能单元 802、延迟时钟单元 803、第一锁存器单元 804 和第二锁存器单元 805、减法器单元 806、逆函数单元 807、乘法器 808、加法器单元 809 和需求增益函数单元 810。

量值稳定器 800 具有四个接口，即，每一个用于需求量值样本输入 $DM(t)$ 、被接收量值样本输入 $RM(t)$ 、需求增益输出信号 $dem_gain(t)$ 和时段引擎接口 C/S。

提供量值稳定器 800 用于将接收到的信号幅度 $RM(t)$ 与借助延迟功能单元 802 生成的延迟的需求信号量值 $DDM(t)$ 进行比较。借助乘法器 808，将通过减法器单元 806 生成的这两个信号之间的差值 $EM(t)$ ， $DDM(t) - RM(t)$ 乘以与延迟的需求信号量值的倒数 $1/DDM(t)$ 成正比的因素，并借助加法器单元 809 将其与先前使用的需求增益值 $dem_gain(t)$ 相加。

图 3 示出了根据图 1 的电路布置的复数到极坐标转换器 700 的详细功能框图。其包括第一功能单元 701，用于从数字接收机 600 接收复数基带信号 I 和 Q，用于在第一输出生成信号 $S=\max(I, Q)$ 并在第二输出生成相位信号 0° 或 90° 。此外，提供逆函数单元 702、第一乘法器 703、第二函数 $\text{atan}(x)$ 单元 704、加法器单元 705、第三函数 $1/\cos(x)$ 单元 706 和第二

乘法器 707, 以生成被接收的量值信号 RM(t) 和被接收的相位信号 PM(t)。

现在将更详细地解释图 1 到 3 中所示的 RF 发射系统的运行。

由下式给出功率放大器 400 的输出信号 RF(t):

$$RF(t) = dem_mag(t) * dem_gain(t) * Gtx(t) * \sin(\omega t + \varphi)$$

其中:

Dem_mag(t)=作为时间函数的 RF 信号的被请求量值;

Dem_gain(t) =作为时间函数的被请求量值的增益;

Gtx(t) =作为时间函数的发射部分的增益 (即乘法器 104 的输出到功率放大器 400 的输出);

ω = RF 信号的载波频率;

φ = RF 信号的偏移相位。

普通成本效率的 RF 功率放大器易于在脉冲之内具有增益变化, 例如像脉冲过冲或脉冲下降以及随脉冲和时间的增益变化。这些是发射部分增益 Gtx(t) 的时间依赖性的主要原因。假设相对于更新被请求量值的增益可使用的速率而言, 发射部分增益变化较慢, 则可以显著减小这些发射部分增益变化的影响。可以通过改变需求量值增益 dem_gain(t) 来减小发射增益变化, 使得两者的积保持恒定, 即:

$$Dem_gain(t) * Gtx(t) = const.$$

这导致这两个信号的变化有如下期望的关系:

$$dGtx(t) = - [ddem_gain(t) / dem_gain(t)] * Gtx$$

通过接收功率放大器 400 的发送功率 FP 监测输出信号测量功率放大器 400 的输出信号。还可以进一步在发射链路中测量另一 RF 信号, 例如位于发射线圈或天线中的 RF 场传感器线圈的 RF 信号。

该 RF “监测” 信号被模数转换器 500 进行数字化并被数字接收机 600 转换成复数基带信号 I 和 Q。由复数到极坐标转换器 700 将基带信号转换成量值 RM(t) 和相位信号 PM(t)。由下式给出被接收量值 RM(t) 和 RF 输出信号 RF(t) 之间的关系:

$$RM(t) = Grx(t) * RF(t) = dem_mag(t) * dem_gain(t) * Gtx(t) * Grx(t)$$

其中:

Grx(t) = 相对于作为时间函数的所生成 RF 信号 RF(t) 的所接收量值

信号 RM (t) 的增益。

由此可以有理由假设，与发射部分的变化相比，被接收发送功率的模拟部分的增益变化是无关紧要的。这意味着可以采用恒定的接收机增益 Grx。由下式给出由于发射增益 Gtx (t) 的变化导致的被接收量值信号 RM (t) 的变化灵敏度：

$$dRM(t) / dGtx(t) = dem_mag(t) * dem_gain(t) * Grx$$

延迟功能单元 802 使需求量值信号 DM (t) 延迟，使其在时间上与被接收量值信号 RM (t) 同步。该延迟等于被接收量值信号 RM (t) 相对于量值需求信号 DM (t) 的传输延迟。延迟可以为微秒量级。

延迟时钟单元 803 产生时钟信号，时钟信号具有约等于该延迟加更新需求所需的时间。在延迟的需求信号 DDM (t) 具有低于可编程阈值电平的信号电平时，延迟时钟单元 803 不工作。

在延迟时钟单元 803 的每个时钟脉冲上，分别将已延迟需求量值信号 DDM (t) 的当前值和被接收量值信号 RM (t) 锁存到第一和第二锁存器单元 804、805 中。

由减法器单元 806 从锁存的延迟需求量值信号 DDM (t) 减去锁存的被接收量值信号 RM (t)。一旦稳定，这一差值信号 EM (t) 将几乎为零。锁存的被接收量值信号 RM (t) 由于发射增益变化而引起的任何变化具有负号，也存在于差值信号 EM (t) 中。因此，由下式给出由于发射增益 Gtx (t) 导致的差值信号 EM (t) 的变化的灵敏度：

$$dEM(t) / dGtx(t) = - dem_mag(t) * dem_gain(t) * Grx$$

与方程 $dGtx(t) = - [ddem_gain(t) / dem_gain(t)] * Gtx$ 结合给出：

$$\begin{aligned} dEM(t) &= - dem_mag(t) * dem_gain(t) * Grx * dGtx(t) \\ &= dem_mag(t) * Grx * Gtx * ddem_gain(t) \end{aligned}$$

因此，为了补偿发射变化，必需要使需求增益信号变化：

$$ddem_gain(t) = dEM(t) / [dem_mag(t) * Gtx(t) * Grx]$$

逆函数单元 807 计算需求量值信号和发射和接收路径增益之积。例如，可以利用可编程查找表实现逆函数单元 807。

由乘法器 808 将逆函数单元 807 获得的结果乘以差值信号 EM (t)。由加法器单元 809 将作为期望的需求增益变化 ddem_gain (t) 的乘法器 808

的输出加到需求增益信号 dem_gain 的当前值上。结果是需求增益的下一值，并将其存储在需求增益函数 810 的需求增益寄存器中。

脉冲开始检测功能单元 801 检查所生成的需求量值样本并在其处于不工作状态且检测到非零样本时生成起始信号。在检测到固定的或可编程的连续数量的零需求量值样本时，其返回到不工作状态。

将脉冲开始检测功能单元 801 产生的起始信号施加到延迟时钟单元 803 和需求增益函数单元 810。这样启动了延迟时钟单元 803 并将需求增益函数单元 810 的需求增益信号初始化为可编程起始值。可以将此用于确保所生成的 RF 脉冲始终从下冲开始，这比过冲更合乎需要。

应当指出，当然也可以通过其他方式实现以上控制功能，例如利用数字信号处理器。

图 4 示出了根据本发明第二实施例、形式为单通道 RF 发射系统的 RF 发射系统的功能框图。可以通过多个这种通道实现多通道 RF 发射系统。

RF 发射系统包括 RF 波形发生器 10，用于在数字域中生成需求 RF 信号，将该 RF 信号馈送到复增益前置补偿器 11 和适配单元 17。复增益前置补偿器 11 的输出与数模转换器 12 的输入相连，用于将输入信号转换到模拟域中。然后经由 RF 功率放大器 13 将模拟输出信号馈送到 RF 发射器 14，发射器例如包括 RF 线圈。

借助于例如小线圈形式的传感器感测 RF 发射信号，传感器位于 RF 发射器 14 处和/或功率放大器 13 的输出处。将这些传感器信号之一（由传感器信号与逻辑或门 15 的组合示意性表示）馈送到模数转换器 16，然后在数字域中供应到适配单元 17，适配单元 17 控制复增益前置补偿器 11。还提供了与适配单元 17 相连的查找表单元 18。

通过这种 RF 发射系统，借助于需求 RF 波形的闭环数字前置补偿，尤其可以在数字域中积极而自动地补偿发射通道中 RF 分量的非线性度以及两个或更多那些发射通道之间的耦合效应，使得获得的复合模拟 RF 发射信号与 RF 波形发生器 10 生成的需求 RF 波形信号具有良好的相互关联。

通常，这是通过提供数字反馈路径来实现的，在数字反馈路径中，适配单元 17 从 RF 波形发生器 10 生成的需求 RF 信号和实际检测到的反馈 RF 发射信号计算所得的差值或误差。使用这一差值或误差对（已借助例如 RF

匀场或发射 SENSE 方法计算出的)需求 RF 信号进行预补偿(预加强),以使实际和需求波形之间的误差或差值最小化。而且,自动解决了由患者运动,例如由于呼吸导致的实际波形与需求波形之间的偏差。于是,不需要在安全裕量中包括该运动,可以使用窄安全裕量,同时避免意外中断扫描。这些窄安全裕量反映出,由于考虑到患者的运动,因而可以减小对 SAR 的高估。

更详细地讲,复增益前置补偿器 11 这样调整来自 R 波形发生器 10 的每个输入 RF 需求信号的幅度和相位(或频率),使得如上所述地补偿任何不希望有的效应。由查找表单元 18 中存储的查找表控制关于更改或调整需求 RF 信号的量的信息,其中由适配单元 17 不断更新查找表。以这样的方式优选地更新查找表的值,使需求 RF 信号和检测到的 RF 发射或输出信号之间的所得差值最小。

优选使用查找表,因为通常适配单元 17 不能充分快地实时计算所需的校正。因此,查找表提供需求 RF 信号和校正信号之间的去耦合。查找表包含幅度和相位(或频率)调制进行转换或内插的信息,以解决发射通道的非线性度或不同发射通道之间耦合的问题。

借助于数模转换器 12 利用直接转换技术将复增益前置补偿器 11 的输出处的经校正(即预补偿)数字信号转换到模拟域中。在 MRI 系统的情况下,数模转换器 12 必须能供应所需场强的拉莫尔频率,例如对于 3T 系统而言为 128MHz。

然后由 RF 功率放大器 13 放大预补偿的模拟信号,之后发送到 RF 发射器 14,发射器 14 例如是 MR 天线或线圈。

模数转换器 16 使用直接转换技术将 RF 放大器 13 的实际 RF 发射信号的一小部分进行数字化,适配单元 17 计算需求和实际信号之间的误差。如上所述,可以通过取功率放大器 13 的输出信号的小部分,或通过有选择地使用耦合电流或每个 RF 发射器 14 处的 RF 场传感器,例如 RF 线圈形式的传感器,来测量实际信号。

目的是使差量/误差信号最小化。需要指出,适配过程利用了实际 RF 信号(输出信号)的延迟版本以及延迟的输入样本。然而,在使用适当高更新频率的模数转换器 16 时,可以忽略这一延迟而一定不会导致任何不稳

定。由于需求 RF 波形和采样输出信号可能会具有不同的时间分辨率，因此将（线性）内插输入信号。

图 5 示出了根据本发明第三实施例、形式也为单通道 RF 发射系统的 RF 发射系统的功能框图。同样可以通过多个这种通道实现多通道 RF 发射系统。

利用相同的附图标记表示与图 4 中相同或对应的部件。

该 RF 发射系统同样包括 RF 波形发生器 10，用于在数字域中生成需求 RF 发射信号，将该 RF 信号馈送到复增益前置补偿器 11 和适配单元 17。复增益前置补偿器 11 的输出与数字到模拟转换器 12 的输入相连，用于将输入信号转换到模拟域中。数模转换器 12 的输出与正交调制器 19 的输入连接，其输出信号经由 RF 功率放大器 13 被馈送到 RF 发射器 14，例如 RF 线圈形式的发射器。

同样，借助于例如小线圈形式的传感器感测 RF 发射信号，传感器位于 RF 发射器 14 处和/或功率放大器 13 的输出处。将这些传感器信号之一（由传感器信号与逻辑或门 15 的组合示意性表示）馈送到正交解调器 20，其输出与模数转换器 16 的输入连接。正交调制器 19 和正交解调器 20 都与本地振荡器 21 连接。

在数字域中将模数转换器 16 的数字输出信号供应给适配单元 17，适配单元 17 同样借助如上所述的查找表单元 18 控制复增益前置补偿器 11。

利用该第三实施例，执行与根据第二实施例相同的方法，不过使用的是解调技术。在这种情况下，数模转换器 12 产生靠近基带（至少远离期望的更高的拉莫尔频率）的模拟信号（经调整的需求 RF 信号），正交调制器 19 将该信号上混频到期望的 RF 发射信号的更高频率。在数字化期间是同样的情况，其中，借助正交解调器 20 对检测到的 RF 发射信号进行下混频，之后将其数字化成模数转换器 16 能够适当处理的基带或频带。

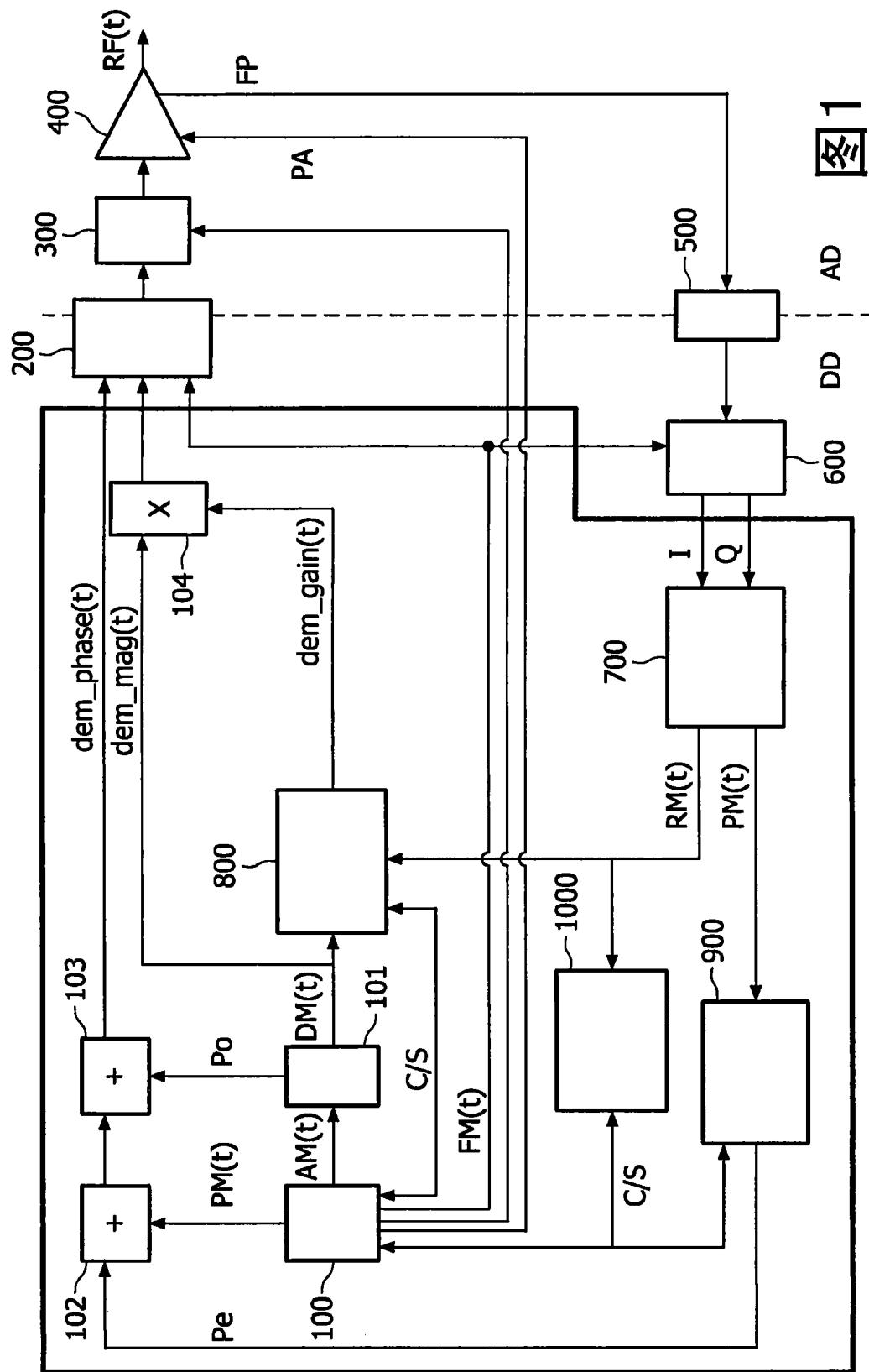
对于场强（例如 7T）而言，在由于缺少数模转换器 12 的适当部件而不能直接应用根据第二实施例和图 4 的直接转换技术时，该转换器 12 可以提供不同于基带（例如 128MHz）的信号，然后正交调制器 19 将信号频率上混频到期望的拉莫尔频率。

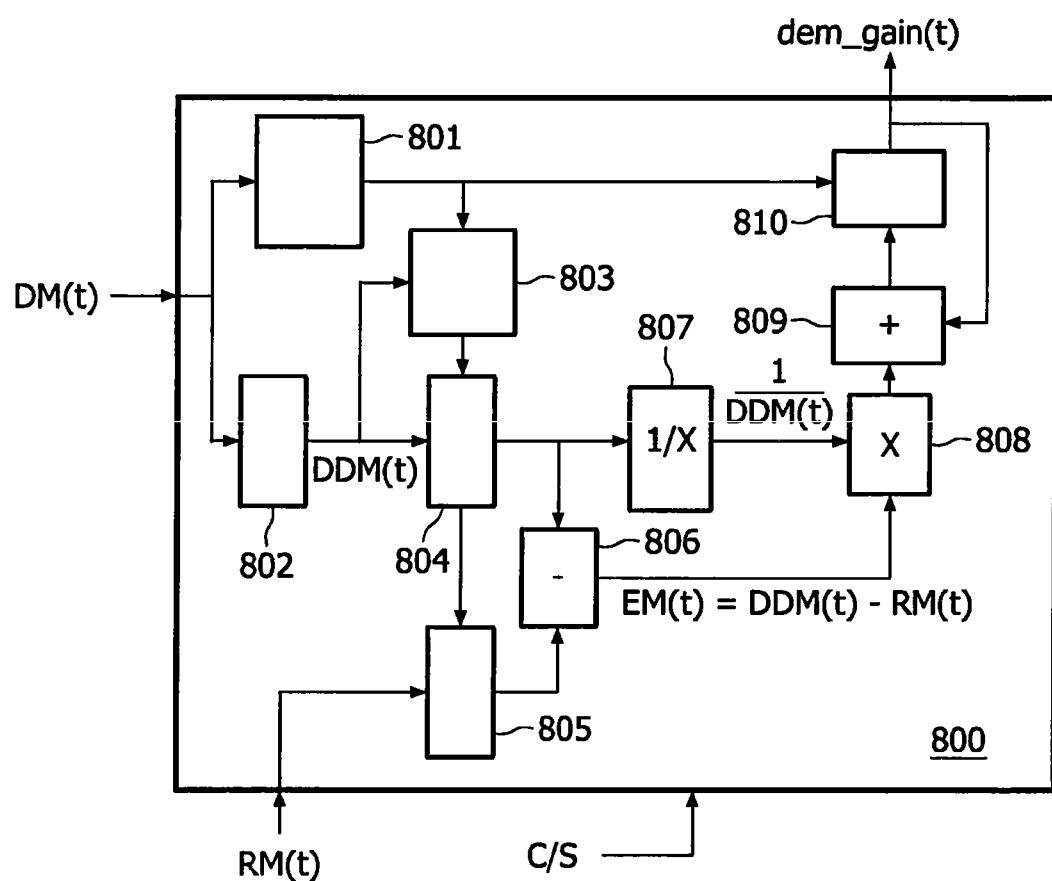
本发明适用于任何具有单通道或多通道 RF 发射能力的 MRI 系统，尤

其对高场强有意义。例如，结合导致不均匀图像的波传播效应（有时也称为电介质谐振）的补偿，能够使用像发射 SENSE 的新方法来克服这个问题。于是，在设计这些多通道 RF 发射系统时这是关键因素。此外，像发射 SENSE 的新方法将实现 MRI 系统的新应用。尽管如此，对于多个 Tx 通道的使用而言，根据本发明精确而独立地控制 RF 信号具有相当大的优点。

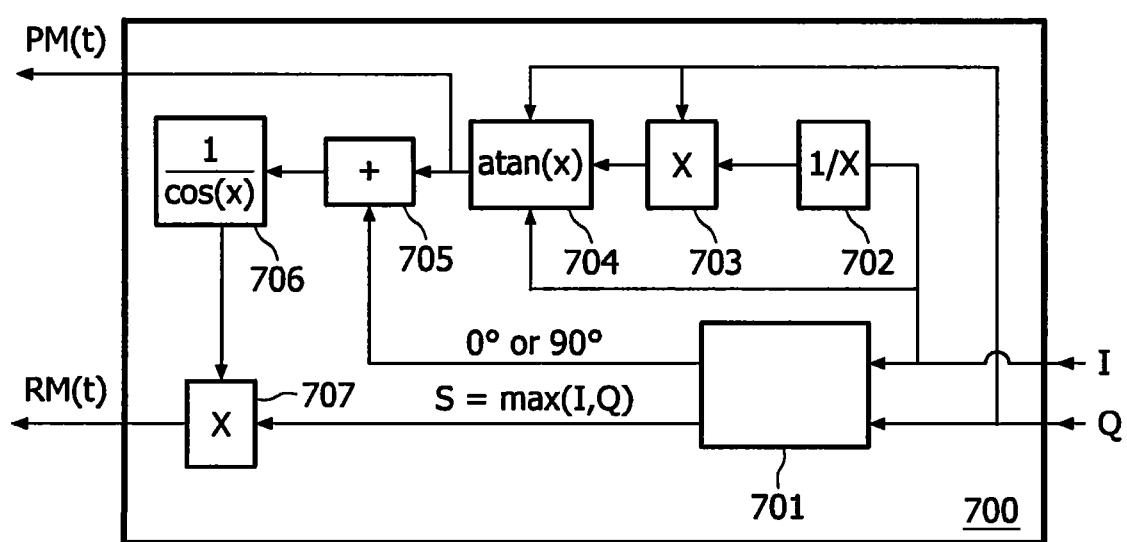
尽管已经在附图和前述说明中展示和描述了本发明，但应当将这种展示和描述视为示例性或示范性的而非限制性的，且本发明不限于所披露的实施例。在不脱离如所附权利要求限定的发明范围的情况下，对上述本发明的实施例做出改变是可能的。

通过研究附图、说明书和所附权利要求，本领域的技术人员在实践所主张的发明时可以理解和实施所披露实施例的变化。在权利要求中，“包括”一词不排除其他元件或步骤，不定冠词“一”不排除多个。单个处理器或其他单元可以完成权利要求中所述若干项的功能。在互不相同的从属权利要求中提到某些措施这一简单事实不表示不能出于有利的目的使用这些措施的组合。计算机程序可以存储/分布在适当介质上，例如光存储介质或与其他硬件一起供应或作为其一部分的固态介质，但也可以以其他形式分布，例如经由因特网或其他有线或无线电信系统分布。权利要求中的任何附图标记都不应被理解为限制其范围。





冬 2



冬3

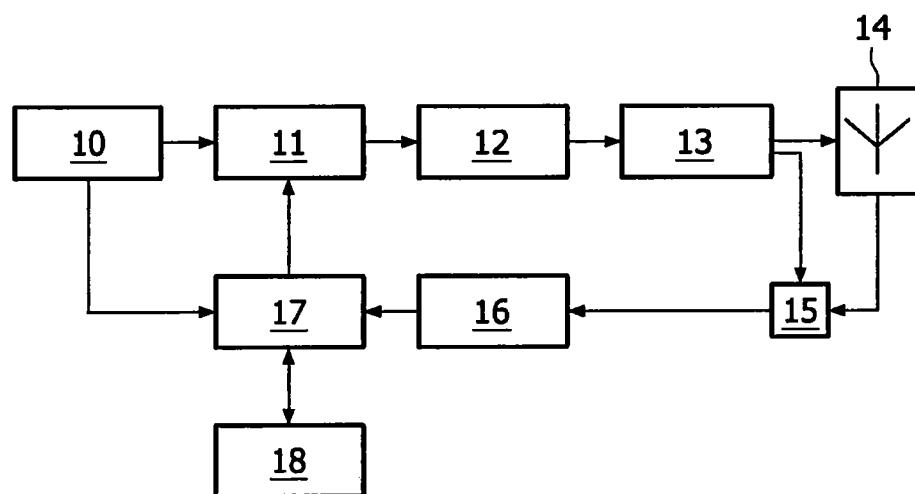


图4

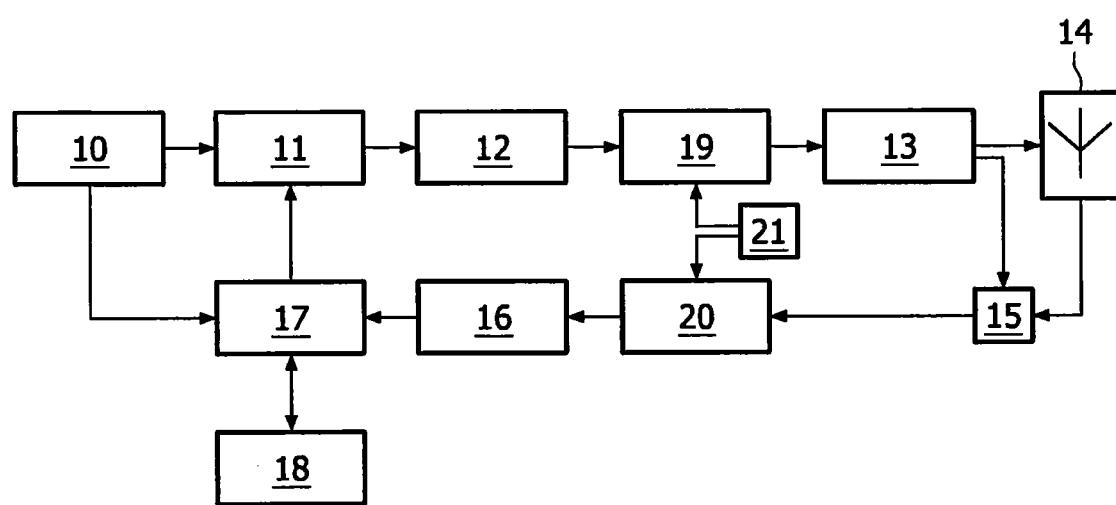


图5