

磁共振现代射频脉冲理论在非均匀场成像中的应用*

张必达¹⁾ 王卫东¹⁾²⁾ 宋泉禹¹⁾ 烜栋林¹⁾ 吕红宇¹⁾ 包尚联¹⁾

¹⁾ 北京大学重离子物理研究所, 北京市医学物理和工程重点实验室, 北京 100871)

²⁾ 解放军总医院, 北京 100853)

(2002 年 7 月 19 日收到, 2002 年 8 月 27 日收到修改稿)

在磁共振非均匀场成像中, 传统的射频脉冲导致回波信号的衰减. 为了减小和消除这种磁共振信号的衰减, 在讨论了经典理论的基础上根据非线性动力学中的逆散射理论和 Shinnar-Le Roux 方法导出了用于非均匀场成像的射频脉冲设计方法. 模拟结果表明, 采用逆散射理论和 Shinnar-Le Roux 方法优化的脉冲序列可以明显提高信号的信噪比.

关键词: 磁共振成像, 射频脉冲, 非线性系统

PACC: 3220D, 87601, 0547

1. 引言

通过施加恒定梯度场的磁共振成像技术可以改善主磁体的开放性、降低梯度功率电子学系统的成本、提高梯度场的强度等. 但是, 由于层面选择的 z 方向上存在着较大的恒定梯度, 传统的频率编码方法已不再适用. 在这种情况下, 利用单次 90° 脉冲激发和多次 180° 脉冲相位聚焦的 CP 序列, 同时在 x 和 y 方向施加编码梯度场, 产生多个回波组成的回波链, 利用多个这样的回波链组成完整的 k 空间图像. 我们称这种方法为多自旋回波链成像序列.

现在的问题是, 经典理论设计的 RF 脉冲能否保证多自旋回波链成像序列具有足够的信号灵敏度和最小的翻转聚焦导致的信号衰减? 事实上, 层面选择方向的静梯度场增大了经典理论设计的射频脉冲所引起的信号灵敏度下降和信号衰减. 为此, 本文研究了现代射频设计的理论和方法, 提出了恒定梯度场磁共振成像的射频脉冲设计方法, 理论和仿真证明了这种方法的有效性.

本文首先介绍磁共振射频脉冲设计的经典理论和方法, 然后讨论现代射频激发原理和射频脉冲的设计方法, 最后讨论它们在非均匀场成像中的应用,

并给出了计算机模拟结果. 结果表明了文中提出的理论和方法的正确性, 为恒定梯度场的磁共振成像技术的应用奠定了基础.

2. 磁共振成像中的射频激发理论

2.1 射频激发的经典解释

对于 Bloch 方程

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \begin{bmatrix} -1/T_2 & \mathbf{G}_r \cdot \mathbf{r} & -B_{1y} \\ -\mathbf{G}_r \cdot \mathbf{r} & -1/T_2 & B_{1x} \\ B_{1y} & -B_{1x} & -1/T_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_0/T_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{G}_r = iG_x + jG_y + kG_z.$$

射频脉冲作用时间一般为毫秒级, 因此绝热近似成立. 定义射频脉冲作用时间为 T , 起始时刻为 $-T/2$. 如果激发的角度足够小, 那么方程(1)的近似解就可表示为

$$M_{xy}(T/2, z) = i\gamma M_0 \exp\left(-i\gamma z G_z \frac{T}{2}\right) \int_{-\infty}^{\infty} B_1(t) \times \exp(i\gamma z G_z t) dt, \quad (2)$$

其中

* 北京市自然科学基金重点项目(批准号 3011002)和科技部十五科技攻关项目(批准号 2001BA706B02)资助的课题.

$$M_{xy} = M_x + iM_y, B_1 = B_{1x} + iB_{1y}.$$

方程(2)表示,在小角近似下,片选方向上的磁矩分布与射频脉冲波形的包络(RF Pulse Envelope)满足傅里叶变换关系^[1].被激发后磁矩在层面选择方向上的分布曲线被称为片选轮廓(slice profile). $\exp\left(-i\gamma z G_z \frac{T}{2}\right)$ 被称为射频激发的初始相位.因此,实际中常用截断的 sinc 函数作为射频脉冲波形

$$\text{sinc}(x) = \text{sin}(x)/x, \quad (3)$$

对于小于 30° 的激发,磁矩分布较严格地遵守傅里叶变换关系;当激发角度大于 90° 时, Bloch 方程的非线性效应十分明显.

磁共振现代射频激发理论采用了求解逆问题的思想,在已知片选轮廓的基础上反解射频脉冲.下面将分别介绍现代理论中有代表性的逆散射理论和 SLR 变换.

2.2. 逆散射变换与 Bloch 方程

根据逆散射理论中的 AKNS 方法^[2],可将 KdV 方程、mKdV 方程、非线性薛定谔方程等一类非线性演化方程^[3,4]化为 Lax 对的形式^[5].若令

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix}, L = \begin{pmatrix} -i \frac{\partial}{\partial x} & iq \\ -ir & i \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix},$$

$$N = \begin{pmatrix} -i\lambda & q \\ r & i\lambda \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & -A \end{pmatrix}.$$

则相应的 Lax 对化为

$$L\psi = -\lambda\psi, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = M\psi. \quad (5)$$

方程(4)为线性薛定谔方程的二维形式.其中 q 与 r 的积代表势能,它们的表达只与特定的非线性演化方程的解有关, λ 代表与时间无关的本征值. L 和 M 为两个线性算子, M 中的元素 $A(x, t, \lambda)$, $B(x, t, \lambda)$ 和 $C(x, t, \lambda)$ 分别为 λ 或 λ^{-1} 的多项式.在确定 L 和 M 的具体形式后,用逆散射方法可求得相应的非线性演化方程的解.逆散射变换巧妙地将非线性演化问题转化为用线性薛定谔方程描述的散射问题,并将非线性计算转化为较简单的三步线性计算^[2],使问题得到简化.

在射频激发过程中,忽略弛豫的影响,可以将 Bloch 方程表示成^[6]

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i\xi & q(\tau) \\ -q^*(\tau) & i\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中

$$\xi = \frac{1}{2}\gamma G_z z T, \tau = \frac{t}{T}, q = \frac{1}{2}i\omega^* T, \quad (7)$$

γ 是旋磁化, G_z 是片选梯度, T 是比例常数^[7], ω 代表射频波形, q^* 与 ω^* 分别为 q 与 ω 的复共轭.将方程(4)中的时间变量 τ 转换成空间变量 x 后,方程(6)化为(4)的形式,从而将时间上有限的射频脉冲波形化为空间上有限的势能分布,并可通过逆散射变换求得.

2.3. Shinnar-Le Roux 方法^[8]

由于施加了片选梯度场,自旋的拉摩频率随其在 z 轴上的位置变化,理想的射频脉冲仅选择性地对所需频率的自旋产生作用.因此,射频激发的过程可以看成是自旋所感应的信号通过一个滤波器的过程.于是 Shinnar 等人采用设计有限冲击响应(FIR)滤波器的方法设计射频脉冲. Shinnar-Le Roux 选择性激发脉冲设计方法简称为 SLR 法,SLR 法是一种数值近似方法,在计算上将连续的射频脉冲离散化.SLR 法的核心就是建立了一个离散变换

$$B_i(t) \xleftrightarrow{\text{SLR}} (A_n(z), B_n(z)), \quad (8)$$

其中 $A_n(z)$ 和 $B_n(z)$ 是两个 n 阶多项式, $B_n(z)$ 为数字滤波器的转移函数, $B_i(t)$ 为射频脉冲波形.称这一离散变换为 SLR 变换,简单的说 SLR 变换是将一个射频脉冲计算问题映射到一个数字滤波器设计问题.

3. 射频场的计算

3.1. 模拟方法

磁共振成像设备是一个比较复杂的系统,回波信号的质量受很多因素的影响,包括样品本身的物理性质、涡流、射频场的均匀性、接收线圈的灵敏度、外界电磁干扰以及各级电子学子系统引入的噪声等.因此,研究射频脉冲对回波信号影响的最好办法就是模拟计算,因为模拟计算仅仅是精确地求磁场中每一点 Bloch 方程的数值解,而无需分析成像系统中其他环节的影响.求常微分方程组(1)的初值问题数值解的方法有很多,其中较为精确的有高阶龙格-库塔法,但高阶龙格-库塔法求 Bloch 方程数值解的时间相对长.求回波信号链的计算量很大,因此有必要寻找更为快速的替代算法.

本文只研究射频脉冲对回波信号的衰减效应,

因此在求解过程中始终采用绝热近似,即忽略 T_1 , T_2 弛豫对信号幅度的影响. 本文在模拟计算中,恒定梯度场取 0.4T/m ,为计算精确,激发层厚仅取 2mm . 射频脉冲的宽度限制在 1ms 以内,回波信号的宽度一般是 0.1ms 的量级. 而 T_2 一般在几十 ms , 所以对于少数回波,弛豫过程的影响不大.

信号的产生可以分为两个阶段,即激发阶段和进动阶段. 在进动阶段,射频场为零而纵向梯度磁场不为零;激发阶段,射频场和纵向梯度磁场都不为零. Bloch 方程在进动阶段可以得到解析解,即磁矩矢量绕 z 轴的匀速旋转过程. 在激发阶段, Bloch 方程在每一时刻的解可以看成是磁矩在瞬间绕梯度场和射频场的矢量和所在轴的旋转. 设磁矩矢量 P 绕任意方向轴 OA 转过一小角度 α 后变为 P^* , 则

$$P^* = R_{OA} \cdot P, \quad (9)$$

其中 R_{OA} 是一个由 5 个矩阵相乘得到的矩阵^[9]

$$R_{OA} = R_x R_y R_z R_y^{-1} R_x^{-1}. \quad (10)$$

将每一时刻的 R_{OA} 连乘在一起,就得到一次射频激发的旋转矩阵 R . 只要 α 取得足够小,采用矢量旋转算法和高阶龙格-库塔法计算结果之间的误差很小. R 与磁矩的初始状态无关,只需计算一次;而高阶龙格-库塔法的求解过程却依赖于磁矩的初值. 因此采用矢量旋转方法可使运算速度得到大幅提高.

3.2. 射频脉冲的计算

3.2.1. sinc 脉冲及其片选轮廓

3.2.2. 逆散射变换自聚焦脉冲

方程 (4) 的精确解是二维 GLM (Gelfand-Levitan-Marchenko) 积分方程^[6]

$$K(\tau, \tau') + F(\tau + \tau') + \int_{\tau}^{\infty} K(\tau, \tau'') F(\tau' + \tau'') d\tau'' = 0, \quad (11)$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ -K_{12}^* & K_{11}^* \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0 & -f^* \\ f & 0 \end{bmatrix},$$

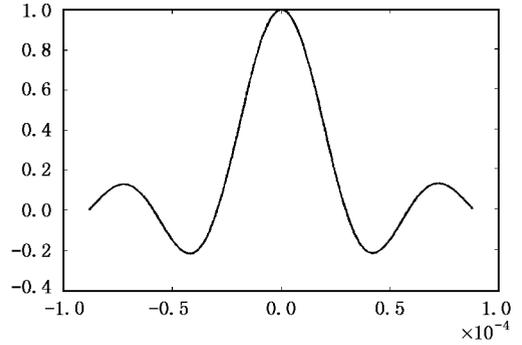
$$q(\tau) = -2K_{12}(\tau, \tau).$$

$$f(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{C^+} b(\xi) e^{i\xi\tau} d\xi, \quad (12)$$

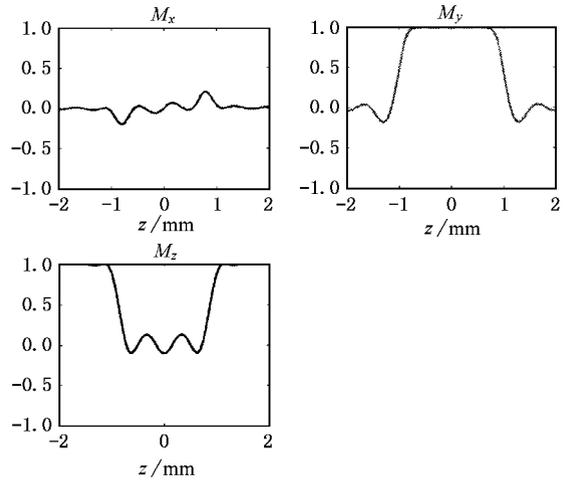
其积分路径 C^+ 是沿着 ξ 所在的复平面上半平面和绕 $b(\xi)$ 所有极点顺时针小圆的积分, $b(\xi)$ 即散射问题中的反射系数. 求解 GLM 方程至少有两种方法^[6]: 第一种,用傅里叶分析先给出一阶近似: K_0

(τ, τ') = $-F(\tau + \tau')$. 利用 GLM 方程建立递推关系,一致逼近理想波形. 第二种,将反射系数表示成一个有理多项式

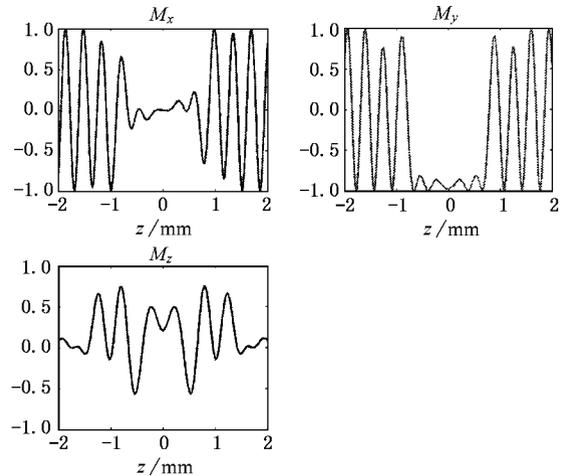
$$b(\xi) = \frac{\alpha \prod_{j=1}^m (\xi - z_j)}{\prod_{k=1}^n (\xi - p_k)}, \quad (13)$$



(a)



(b)



(c)

图 1 (a) 波瓣 sinc 脉冲射频波形; 图 1(b) 波瓣 sinc90°脉冲片选轮廓; 图 1(c) 波瓣 sinc180°脉冲片选轮廓 (其中 M_x , M_y 和 M_z 分别代表磁矩三个分量在 z 轴的分布)

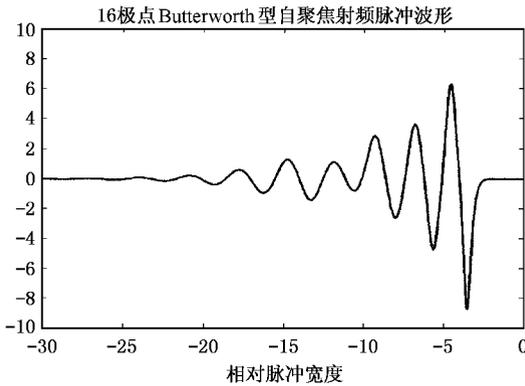
代入 GLM 方程,通过逆散射理论及 Zakharov-Shabat 方法^[10,11]求得势能 $q(\tau)$.由于磁矩分布与反射系数满足如下关系:

$$M_{xy} = \frac{2b}{1 + |b|^2}, \quad (14)$$

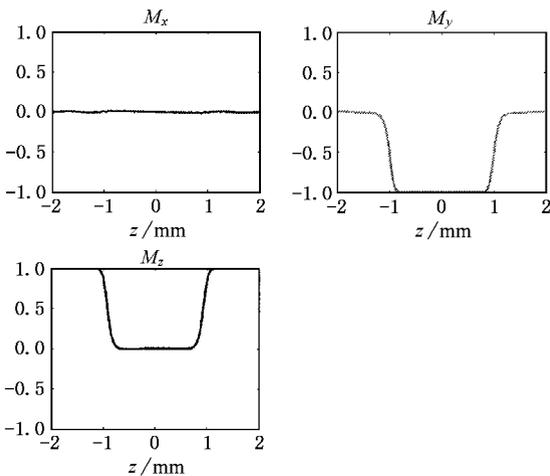
这样,逆散射法射频脉冲计算被简化为一个无限冲击响应(IIR)滤波器设计问题.可以用全极点的多项式来逼近磁矩分布

$$b(\xi) = \frac{i}{\prod_{k=1}^n \left(1 - \frac{\xi}{p_k}\right)}, \quad (15)$$

极点的排列方式可以有很多,如矩形^[6]、圆形(Butterworth 型)、椭圆形(Chebyshev 型)^[7]等.下面是采用逆散射变换得到的自聚焦射频脉冲及其片选轮廓.首先是 Butterworth 型 90° 脉冲,如图 2.



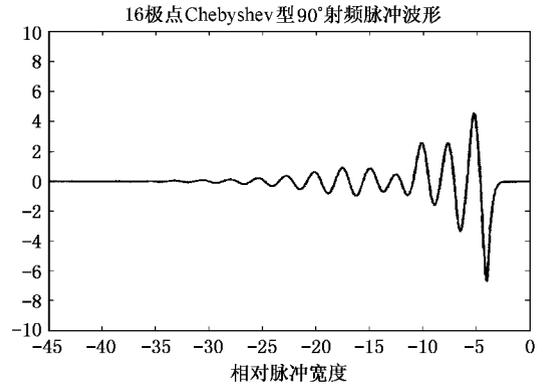
(a)



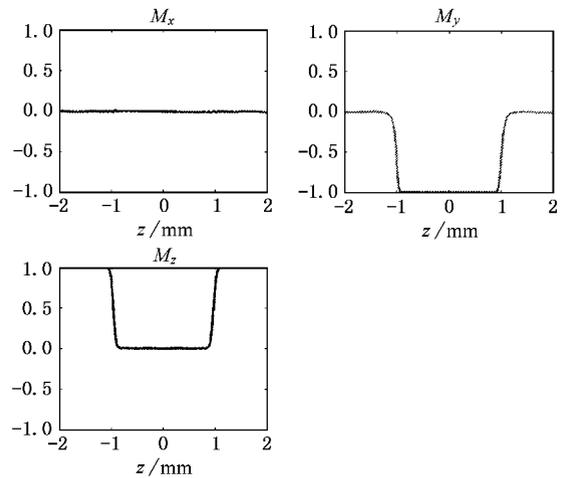
(b)

图 2 (a)16 个极点按 Butterworth 型分布得到的 90° 射频波形, (b)16 个极点按 Butterworth 型分布得到的片选轮廓

以下是 Chebyshev 型 90° 脉冲,如图 3. Chebyshev 型 180° 脉冲,如图 4.



(a)



(b)

图 3 (a)16 个极点按 Chebyshev 型分布得到的 90° 射频波形 (b) 16 个极点按 Chebyshev 型分布得到的片选轮廓

3.2.3. SLR 变换射频脉冲设计

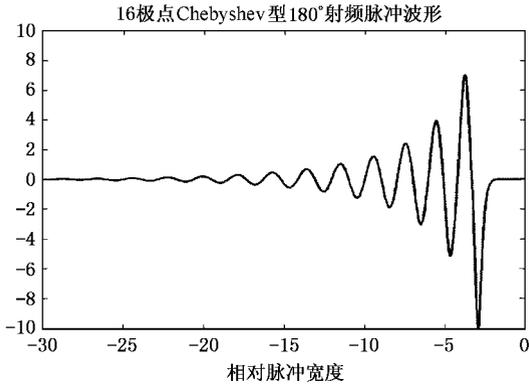
SLR 变换计算方法如下,首先给出需要设计的射频脉冲的技术参数,如带宽、时宽、片选轮廓在片内和片外的纹波系数和射频波形的采样率,然后将这些射频脉冲参数转换为 FIR 数字滤波器的设计参数,用切比雪夫逼近法(Parks-McClellan 方法)设计出滤波器,然后将滤波器映射回射频波形.SLR 变换过程如下:

$$\phi_j = 2 \tan^{-1} \left| \frac{B_{j0}}{A_{j0}} \right|, \quad (16)$$

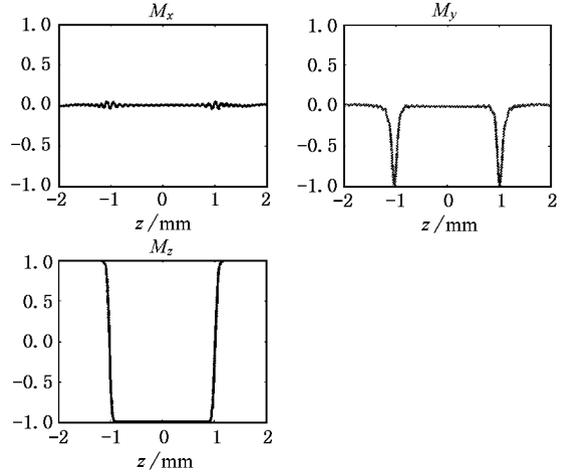
$$\theta_j = \angle(-iB_{j0}/A_{j0}), \quad (17)$$

$$B_{1,j} = \frac{1}{\gamma \Delta t} \phi_j e^{i\theta_j}, \quad (18)$$

其中 $B_{1,j}$ 为射频波形离散化后第 j 个硬脉冲的幅度, ϕ_j 为在第 j 个硬脉冲作用下磁矩旋转的角度, θ_j 是脉冲的相位, B_{j0} 为 j 阶多项式 $B_j(z)$ 的第 1 项.

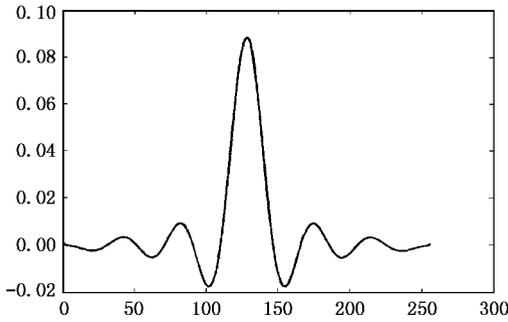


(a)

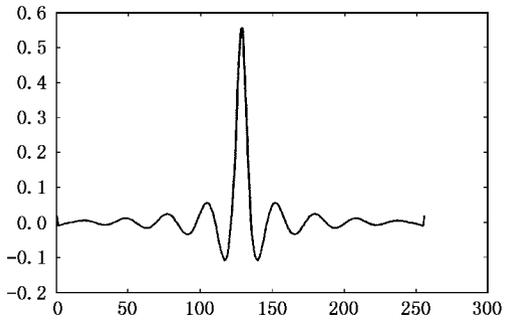


(b)

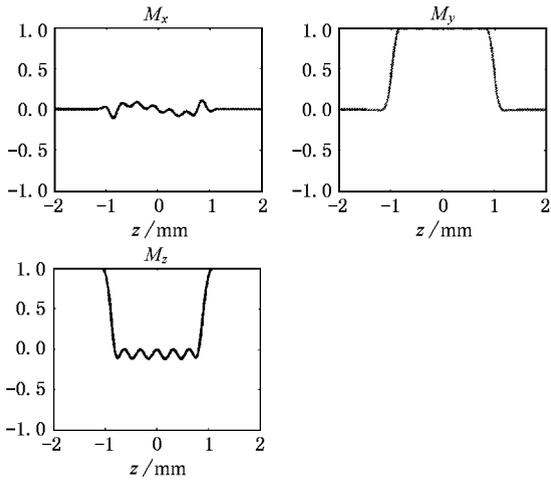
图 4 (a) 16 个极点按 Chebyshev 型分布得到的 180° 射频波形 (b) 16 个极点按 Chebyshev 型分布得到的片选轮廓



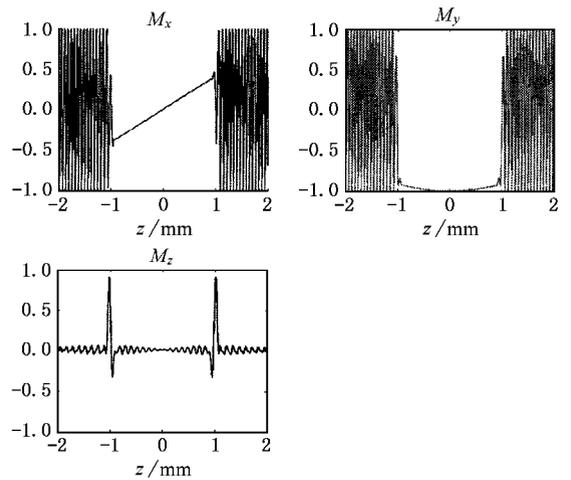
(a)



(c)



(b)



(d)

图 5 (a) SLR 变换 90° 射频脉冲波形 (b) SLR 变换 90° 脉冲片选轮廓 (c) SLR 变换 180° 射频脉冲波形 (d) SLR 变换 180° 射频脉冲片选轮廓



4. 结果的讨论

对于简单的自旋回波序列,射频脉冲设计引起的信号损失不大,一般采用截断的 sinc 脉冲设计射频脉冲.但对于非均匀场成像问题,Bloch 方程的非线性效应对射频激发的影响非常明显,采用傅里叶分析设计的射频脉冲导致 CP 序列产生的回波链中回波峰值迅速衰减(见图 6).为解决这一问题,首先可以考虑 CPMG 序列.CPMG 序列是 Meiboom 和 Gill 对 CP 序列的改进序列.本文采用了 CPMG 序列的思想,所不同的是将 180° 脉冲射频场交替施加于 x 轴的正负方向,而 CPMG 序列是将射频场施加于 y 轴,使磁矩来回翻转以消除 180° 不精确造成的误差积累.

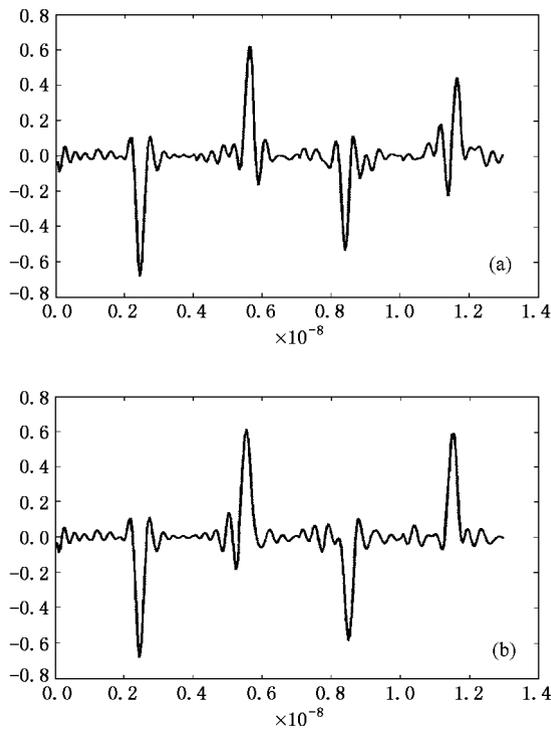


图 6 (a)由 3 波瓣 sinc 型 90° 脉冲激发 4 个 3 波瓣 sinc 型 180° 脉冲翻转产生的回波信号链 (b)由 3 波瓣 sinc 型 90° 脉冲激发 4 个 3 波瓣 sinc 型 180° 脉冲组成的 CPMG 序列产生的回波信号链

采用 CPMG 序列后,信号衰减的速度明显降低,但结果仍不理想.首先,采用 sinc 脉冲,回波信号的峰值依赖于回波时间(TE)并不断波动,对于不同的 90° — 180° 脉冲间隔、 180° — 180° 脉冲间隔,回波信号衰减的规律相差较大,导致对编码造成误差;其次,衰减不能完全消除,回波链中后面的回波信号的信

噪比无法保证,第一个回波归一化的峰值仅是理想激发时的 70% 左右,信噪比低;此外,由于片选梯度是静梯度场,存在初始相位,传统的 90° 激发脉冲无法探测到自由感应衰减信号,这样对计算相移 (phase shift) 带来一定麻烦.

与传统方法相比,采用现代射频脉冲理论设计的射频脉冲,具有在选片厚度内均匀激发,选片边缘锐利,在选片外部无旁瓣、纹波小,以及 180° 脉冲能使自旋精确聚焦等特点.下面将具体讨论.

利用逆散射理论计算射频波形的优点是明显的.首先逆散射变换是 Bloch 方程的解析逆反演,具有重要的理论意义,也是非线性动力学在磁共振中的有趣应用之一.由方程 (11) 可看出,如果只取一阶近似,射频波形和片选轮廓之间满足傅里叶变换关系.利用逆散射理论计算射频脉冲是一个介于数学与工程之间的问题.因此,即具有数学问题求解过程严格以及求解思路灵活的特点又有工程上易于实现的特点.同时,通过修改反射系数的表达,逆散射变换在设计功能复杂的射频脉冲方面显得更容易实现.采用逆散射方法导出的射频脉冲,对选片的定义最为精确,具有最理想的片选轮廓,可以提供更好的信噪比和对比度,适于 3D 成像.在越来越强调功能成像的今天,逆散射理论近年来受到了更多的关注^[7].此外,逆散射变换可设计出自聚焦脉冲,即脉冲结束的同时出现自由感应衰减信号,因为没有相移,这种脉冲使确定回波信号峰值的位置更容易.

但是,逆散射理论也存在缺陷.基于贝克隆变换和非线性叠加公式的反演方法的计算量随系统极点数目的增加而急速增加,而较少的极点数目又不足以给出良好的片选轮廓.设计用于自旋回波的 180° 脉冲时,由于没有相应的代数简化算法,逆散射法的实用性不强.

SLR 法将射频脉冲分解为多个硬脉冲的采样,这就决定了 SLR 法是一种偏重于工程应用的方法.利用 SLR 法计算出的 90° 和 180° 脉冲,具有良好的片选轮廓,但激发层边缘不如逆散射脉冲得到的激发层边缘锐利,激发层内有一定纹波,这是其 FIR 滤波器设计方法决定的.在确定信号带宽(信号带宽正比于片厚与片选梯度的乘积)与纹波系数后,该方法可以根据射频脉冲的持续时间对射频波形做自适应调整,而逆散射法做不到这种调整,所以对于确定的信号带宽,射频场持续时间也一定.SLR 法计算的 180° 脉冲可以用于自旋回波成像,同时也可以设计一些

复杂功能的射频脉冲. 总体上说 SLR 法在工程上的可实现性较好, 各方面表现均衡, 因此实际成像中应用广泛.

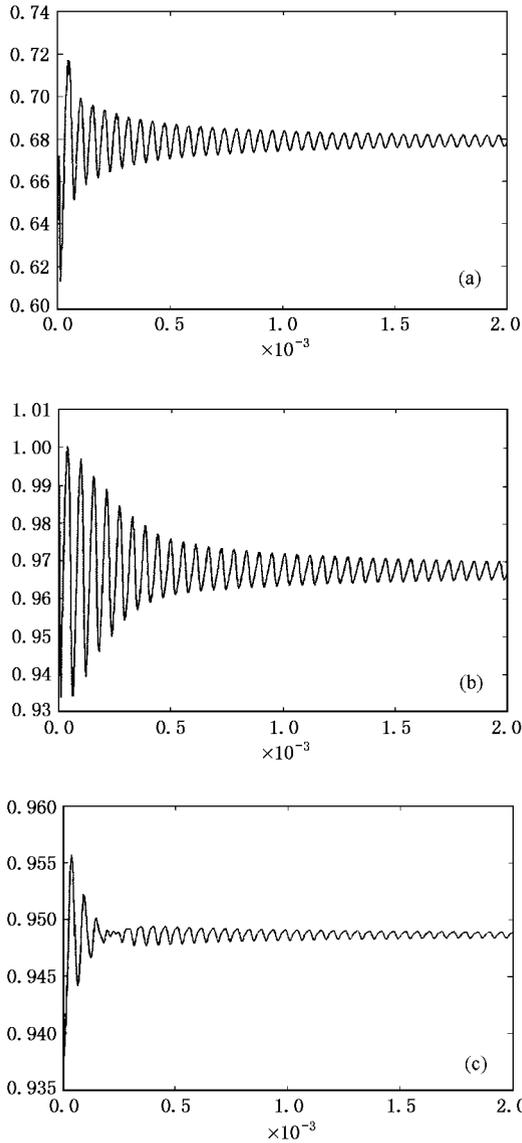


图7 (a) 90° sinc 脉冲— 180° sinc 脉冲组合得到的单回波信号归一化峰值随 TE 波动曲线 (b) 90° 逆散射脉冲— 180° SLR 脉冲组合得到的单回波信号归一化峰值随 TE 波动曲线 (c) 90° SLR 脉冲— 180° SLR 脉冲组合得到的单回波信号归一化峰值随 TE 波动曲线

下面将集中讨论逆散射变换与 SLR 变换计算出的射频脉冲在非均匀场成像中的表现. 模拟计算表明在非均匀场成像中, 回波的峰值与回波时间 (TE) 有关. 本文列出了不同射频脉冲组合产生的回波链中第一个回波的峰值随 TE 的变化关系 (见图 7). 纵坐标为归一化的信号强度, 横坐标为 TE. 从图中可看出, 回波峰值随 TE 波动的曲线振荡衰减, 最

后趋于平衡.

射频激发是一个复杂过程, 很难给出解析的解释, 但可以定性地理理解这一现象: 由于片选梯度是一个静梯度, 在射频激发结束后, 磁矩在不断进动、散焦, 由于射频翻转脉冲不是理想的, 其对不同位置、不同相位磁矩的翻转效果不一样. 因此在磁矩散焦的过程中回波信号的峰值也在振荡衰减, 并趋于平衡. 这一现象与在常规二维自旋回波成像中信号峰值与 TE 无关的已知结论并不矛盾. 因为在常规成像中, 射频脉冲结束、相位聚焦后, 片选梯度场也随之关断, 磁矩的相位不再发生变化.

在选择非均匀场成像中的射频脉冲时需要考虑如下两个因素. 经过射频脉冲作用后信号的损失足够小, 这样可以提供更高的信号灵敏度, 信号峰值的波动尽量小以避免编码误差.

若将通过逆散射变换得到的脉冲称为逆散射脉冲, 将通过 SLR 变换得到的脉冲称为 SLR 脉冲. 90° 逆散射脉冲— 180° SLR 脉冲产生的回波信号灵敏度最高, 但峰值波动偏大, 不过波动幅度仍小于 90° sinc— 180° sinc 脉冲产生的回波; 90° SLR 脉冲— 180° SLR 脉冲产生的回波信号灵敏度低一些, 但波动最小. 从性能上看, 波动稳定后, 若仅计算一个回波, 逆散射—SLR 脉冲产生的自旋回波信号比 90° sinc— 180° sinc 脉冲产生的自旋回波信号的信噪比提高 3.3 dB, SLR—SLR 脉冲比 90° sinc— 180° sinc 脉冲的信噪比提高 3.0 dB. 若考虑到多回波的信号衰减, 信噪比的提升还要高得多.

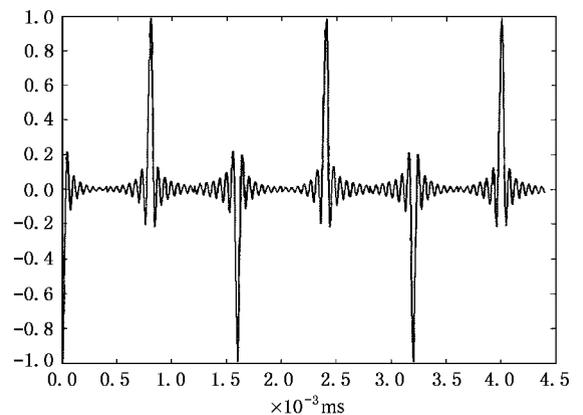


图8 90° 逆散射— 180° SLR CPMG 脉冲序列得到的回波信号链

对于多回波脉冲序列, 90° 逆散射脉冲— 180° SLR 脉冲组成的 CPMG 脉冲序列 (逆散射-SLR CPMG 序列) 与 SLR—SLR CPMG 脉冲序列可以在产生高信

噪比信号的同时保持回波链中的回波信号峰值,在不改变硬件系统的条件下大幅改善图像质量或减少成像时间.

5. 结 论

本文阐述了现代磁共振射频脉冲理论中最具代表性的逆散射理论和 Shinnar-Le Roux 方法,并在模拟计算的基础上研究了它们在非均匀场成像中的应

用.结果表明,逆散射理论和 Shinnar-Le Roux 方法设计出的射频脉冲基本上消除了非均匀场成像中回波信号链的衰减,并使非均匀场成像成为可能.以上脉冲设计方法同样可以应用于常规成像.

衷心感谢 Amir Schricker 先生提供的 SLR 变换代码,以及谢君诚先生在硕士论文中所附的逆散射变换部分代码.他们的帮助,使我在实现算法的过程中少走很多弯路.

- [1] Vlaardingerbroek M T and Boer J A D 2000 *Magnetic Resonance Imaging-Theory and Practice* (Springer)
- [2] Liu S K and Liu S D 2000 *Nonlinear Equations in Physics* (Peking University Press [in Chinese] 刘式适、刘式达 2000 物理学中的非线性方程(北京:北京大学出版社))
- [3] Liu S K, Fu Z T, Liu S D and Zhao Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2068 (in Chinese [刘式适、傅遵涛、刘式达、赵 强 2001 物理学报 **50** 2068])
- [4] Liu S D, Fu Z T, Liu S K and Zhao Q 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 718 (in Chinese [刘式适、傅遵涛、刘式达、赵 强 2002 物理学报 **51** 718])
- [5] Wei Q, Wang Q, Shi J L *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 99 (in Chinese [卫 青、王 奇、施解龙等 2002 物理学报 **51** 99])
- [6] Rourke D E Morris P G 1992 *J. Magn. Reson.* **99** 118
- [7] Xie J C 1996 Master Thesis Taiwan University [谢君诚 1996 硕士学位论文(台湾大学)]
- [8] Pauly J, Roux P L *et al* 1991 *IEEE Transactions on Medical Imaging* .**10**(1)
- [9] Sun J G and Yang C G 1997 *Computer Graphics* (Beijing :Tsinghua University Press [in Chinese] 孙家广、杨长贵 1997 计算机图形学(清华大学出版社)]
- [10] Infeld E, Roulands ,G 2000 *Nonlinear Waves ,Solitions and Chaos* . 2 nd Edition(Cambridge University Press)
- [11] Zakarov V E , Shabat A B 1972 *Soviet Physics Jetp* . **34** 62

The application of modern radio-frequency excitation theory in nonhomogeneous field magnetic resonance imaging *

Zhang Bi-Da¹⁾ Wang Wei-Dong^{1,2)} Song Xiao-Yu¹⁾ Zu Dong-Lin¹⁾ Lü Hong-Yu¹⁾ Bao Shang-Lian¹⁾

¹⁾*Institute of Heavy Ion Physics ,Beijing Medical Physics and Engineering Key Laboratory ,Peking University ,Beijing 100871 ,China)*

²⁾*People 's Liberation Army General Hospital ,Beijing 100853 ,China)*

(Received 19 July 2002 ; revised manuscript received 27 August 2002)

Abstract

In the problem of nonhomogeneous field magnetic resonance imaging(MRI) ,echo peaks decay quickly due to traditional design of radio frequency(RF) pulse. In this article ,using inverse scattering transform(IST) of the nonlinear dynamics and Shinnar-Le Roux selective excitation pulse design algorithm(SLR Algorithm) ,we have designed the RF pulse for the nonhomogeneous field MRI. Simulation has been made to test the signal loss induced by the excitation of different types of RF pulses. Simulation results show that the RF pulse sequence optimized by IST and SLR algorithm can improve the signal to noise ratio of MRI considerably

Keywords : magnetic resonance imaging , radio frequency pulse , nonlinear dynamical systems

PACC : 3220D , 8760I , 0547

* Project supported by the Key Program of Natural Science Foundation of Beijing ,China (Grant No. 3011002) and the Key Program of the Tenth Five-year Plan of the Ministry of Science and Technology (Grant No. 2001BA706B02).