

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2023.03.005

基于 System Generator 的多源 MRI 数字化射频发射方法

刘颖, 钟凯, 章浩伟, 刘意

(上海理工大学健康科学与工程学院医学影像工程研究所, 上海 200093)

【摘要】 该文将多通道并行发射技术与数字调制技术应用于磁共振成像 (MRI) 射频信号发射, 提出了一种多源 MRI 数字化射频发射方法。该射频发射方法通过现场可编程门阵列 (FPGA) 实现直接数字式频率合成 (DDS), 由 FPGA 内部存储器存储射频脉冲波形, 并以正交混频的方法进行数字上变频 (DUC)。该方法更加简便易操作, 提高了集成度与灵活性, 应用多速率信号处理技术提高了数据率变化的灵活性; 应用 Xilinx 公司的数字信号处理 (DSP) 开发工具 System Generator 进行设计开发, 降低了数字化开发难度。该设计验证了多源数字化射频发射的功能, 测试结果证明了该发射方法的有效性。

【关键词】 多源发射; 数字上变频; 磁共振信号; 多速率信号处理

【中图分类号】 O482.53

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242 (2023) 03-0253-07

Multi-source MRI Digital Radio Frequency Emission Method Based on System Generator

LIU Ying, ZHONG Kai, ZHANG Haowei, LIU Yi

(Institute of Medical Imaging Engineering, School of Health Science and Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】 This study designs a multi-source MRI digital radio frequency transmission method by applying multi-channel parallel transmission technology and digital modulation technology to magnetic resonance imaging (MRI) radio frequency signal transmission. This radio frequency method realizes direct digital frequency synthesis (DDS) through FPGA, stores the radio frequency pulse waveform in the internal memory of FPGA, and performs digital up-conversion (DUC) by means of quadrature mixing. This method is simple and easy to operate, improves the integration and flexibility, and applies multi-rate signal processing technology to improve the flexibility of data rate changes. In addition, it uses the Xilinx's digital signal processing (DSP) development tool System Generator for design and development, reducing the difficulty of digital development. The design verifies the function of multi-source digital radio frequency transmission, and the simulation and test results prove the effectiveness of the transmission method.

【Key words】 Multi-source Emission; Digital Up-conversion; Magnetic Resonance Signal; Multi-rate Signal Processing

收稿日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助 (61101174)。

作者简介: 刘颖, 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事磁共振成像技术的研究工作, E-mail: ling2431@163.com。

0 引言

近年来,磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)系统为了追求更高的信噪比,不断地往高场发展,但更高的频率和更短的波长导致了射频场不均匀。多源射频发射技术作为该问题的解决方法之一,不仅能加速射频脉冲,还能降低特殊射频吸收率(Specific Absorption Rate, SAR)的限制^[1]。由于射频场的均匀性对 MRI 的质量有着重要影响,因此多源射频发射技术在高场 MRI 的发展中有着重要作用。

多源射频发射技术并行输出多路频率、相位、幅值可独立调节的射频信号^[2]。目前,多源射频发射系统的实现方法主要有 2 种^[3]。①以数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)或现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)为主控芯片,采用多路直接数字频率合成(Direct Digital Synthesis, DDS)芯片;利用 DDS 内部集成运算器和主控系统读取存储器的波形调制数据,通过模拟乘法器实现波形调制,从而实现对每个通道的独立调节。②利用 FPGA 的内核直接实现 DDS,通过 FPGA 的存储器读取包络信号数据,两者经过 FPGA 内部乘法器进行波形调制,然后采用 DAC 输出 RF 信号。方法①使用多个 DDS 器件和调制电路,硬件电路较复杂,抗干扰能力较差,硬件成本高,需要较多的数据接口。方法②将调制电路集成于 FPGA 内部,降低了硬件的复杂程度,抗干扰能力强,硬件成本低,提高了设计的灵活性,并且频率、相位、幅值精度不受器件限制,但开发难度高。

本文提出了一种适用于高场的 MRI 数字化射频发射方法,利用多源射频发射技术来解决高场下 B1 场不均匀的问题,采用 System Generator 开发工具及 Xilinx 的 IP 核构建 DDS 和数字调制,降低了开发难度,实现了多源射频发射,同时避免了多片 DDS 芯片的硬件成本,加强了系统的集成化程度,灵活性强。此外,利用 System Generator 开发工具还能获取 FPGA 的数字信号,实现数字化射频系统的设计、实现和验证。

1 多源数字化射频的原理与方法

1.1 多源发射的原理

高场 MRI 受抗电阴影和特殊射频吸收率(Specific Absorption Rate, SAR)的限制和影响^[4]。抗电效应对

B1 场的均匀性造成影响,高 SAR 会对人体扫描造成安全隐患,同时影响成像扫描速度^[5]。

多源发射技术利用多个射频源进行射频匀场的原理如下。假设一个射频激励系统有以下条件^[6]。①系统的弛豫和非共振效应可以忽略;②激励翻转角 $\leq 30^\circ$,即纵向磁化近似其平衡值。那么当该射频场均匀时,在 T' 时刻横向磁化矢量可以用公式(1)表示:

$$\xi(r, T') = j\gamma a(r) \int_0^{T'} b(t') e^{j2\pi r^T k_x(t')} dt' \quad (1)$$

式中, γ 为旋磁比, $a(r)$ 为净磁化强度, $b(\tau)$ 为单个可控复值射频脉冲, $r = [x, y, z]^T$, $k_x(\tau)$ 为 K 空间轨迹。

式(1)中的射频脉冲可另表示为关于射频场空间分布和脉冲包络信号 $b(\tau)$ 的函数,且 $t_N(R)$ 不随时间变化而改变, N 个发射通道条件下的射频场可表示为:

$$d_n(r) = j\gamma \int_0^{T'} b_N(t') e^{j2\pi r^T k_x(t')} dt' \quad (2)$$

多源射频发射的横向磁化矢量可表示为:

$$b_N(r, \tau) = \sum_1^N c_N(r) b_N(\tau) \quad (3)$$

式中, $d_n(r)$ 表示多源射频激励剖面,它由 N 个通道的射频脉冲 $b(\tau)$ 控制。因此,通过调整 N 个通道的射频脉冲就能实现射频匀场。

1.2 多源数字化射频发射方法

数字化射频发射通过数字调制的方式,避免了模拟器件的非线性效应引起的信号质量差问题^[7]。具有硬件集成、可重构性等特点的 FPGA 的普及,推动了 FPGA 在数字化射频开发中的应用^[8]。同时,具有高分辨率、快速频率转换、低噪声等特点^[9]的 DDS 相较于模拟频率源具有更大的优势。因此,设计在 FPGA 中以 DDS 技术和数字调制方法代替传统的频率源及调制电路的方式来产生射频信号。该方法使用 FPGA 逻辑资源实现调制。为了避免工艺带来的杂散和失真问题,设计通过混频得到较高频率的磁共振信号,并通过内插抽取来匹配载波信号数据速率,同时采用正交混频来提高频带利用率。

综上所述,该设计的多源数字化射频发射方法利用 FPGA 构建多个 DDS 内核,与 ROM 读取的脉冲波形文件进行调制,再通过内插与正交混频得到多路射频信号,其框架如图 1 所示。

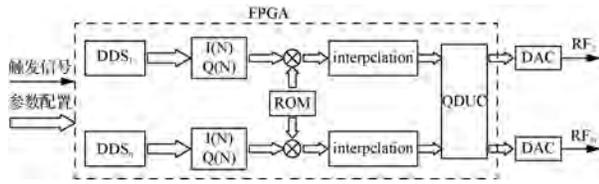


图 1 多源数字化射频发射方法框架

Fig.1 Block diagram of multi-source digital emission method

2 基于 System Generator 的射频发射方法设计

System Generator 是 Xilinx 与 MathWorks 公司开发的一种进行数字信号处理的设计软件，它将 DSP 的抽象算法转化为可靠的硬件实现，并通过可视化的 DSP 算法设计，大幅降低了 DSP 算法的开发难度^[12]。

多通道数字上变频 (Digital Up Converter, DUC) 的每个通道设计方案框图如图 2 所示。该设计的 DUC

射频发射模块依次为脉冲调制、HB 半带滤波器、FIR 数字滤波器、级联积分梳状 (Cascaded Integrator-Comb, CIC) 滤波器、数控振荡器 (Numerically Controlled Oscillator, NCO)、数字混频器。图中的 I、D 分别表示内插因子和抽取因子。出于对硬件资源与成本的考虑，本设计以 4 通道进行设计与仿真。

2.1 DDS 系统设计

本设计以 DDS IP 核来设计 DDS 系统 (见图 3)，使用 FPGA 硬件可编程的 ZYNQ-7000 SOC 芯片实现频率、相位的可编程输入，DDS 信号经乘法器与波形信号进行调制。DDS IP 使用相位增量 (频率控制字 PINC) 和相位偏移 (相位控制字 POFF) 来获取取样地址，从而映射到所需的输出波形^[13]。

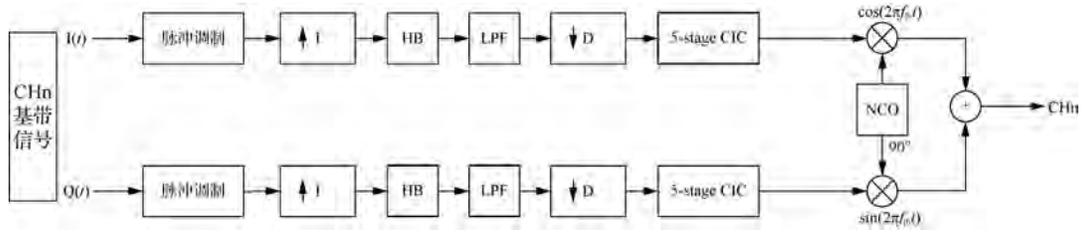


图 2 通道设计方案框图

Fig.2 Block diagram of designing scheme

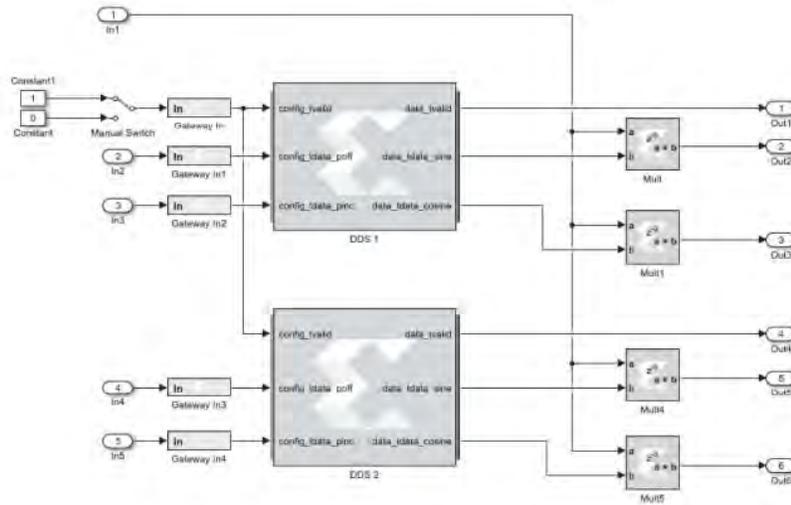


图 3 DDS 系统设计框图

Fig.3 Block diagram design for DDS system

2.2 脉冲波形设计

脉冲波形调制的设计框图如图 4 所示，其利用 ROM 存储波形的幅值信号，FPGA 内部搭建计数器进行计时，计数器以一定的步长累加作为 ROM 的地址输

入，同时计数器以脉冲波形的采样间隔作为周期^[14]，采样间隔使用 SOC 芯片实现可编程输入，每个计数周期依次读取 ROM 中的波形幅值数据，最后输出信号用乘法器以系统工作时钟为周期，与 DDS 正弦输出信号进行调制。

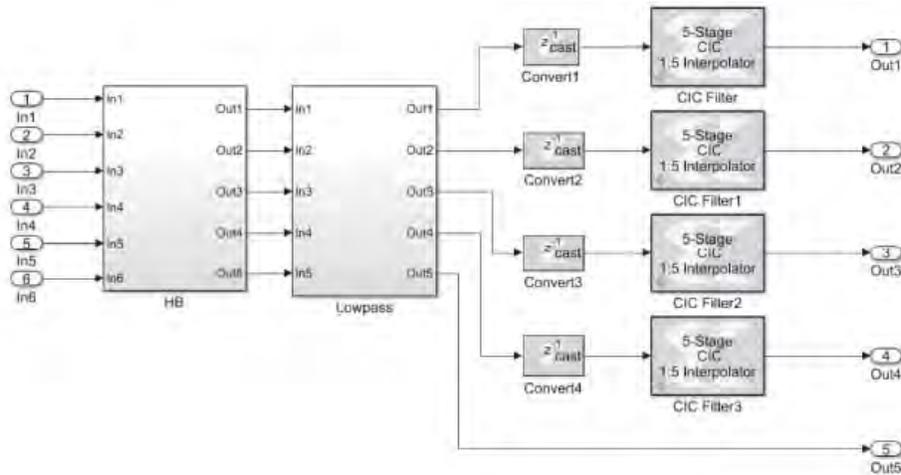


图 4 内插抽取滤波设计框图

Fig.4 Block diagram of interpolation filter design

2.3 多级内插抽取滤波器设计

上变频中的 DDS 信号为了灵活地与 NCO 的采样信号匹配，使用内插抽取级联的方式提高采样率的灵活性。在数字信号处理中，通常先进行插值，然后进行抽取，以避免造成频率混叠，同时在插值之后、抽取之前进行滤波来去除镜像干扰^[15]。在多数率信号处理中，半带滤波一般用于实现 $I=2M$ (2 的幂次方倍) 的内插；CIC 滤波器用于 $I=N$ 的整数倍内插。两者级联可实现 $I=N \cdot 2M$ 倍数的内插。

本设计基于上述内容使用 Matlab 提供的数字滤波工具箱 FDA Tool 和 Xilinx 提供的 FIR IP 核构建 HB 半带滤波、低通 FIR 滤波、CIC 滤波的级联，如图 4 所示。由于内插系统中的内插因子 I 往往不是整数倍，因此系统在半带内插滤波和 CIC 内插滤波之间加入了 $D=L$ 的整数倍 FIR 抽取滤波，使得内插因子 $I=N \cdot 2M/L$ ，从而提高了采样率变化的灵活性，使之能够匹配不同的 NCO 系统。

2.3.1 半带滤波模块

半带滤波器 (Half-Band Filter, HB) 由于其理想冲激响应 $h(n) = \sin(\pi n / 2) / (\pi n / 2)$ ，冲激响应除零点外的偶数点均为零，因此在多数率信号处理中减少了一般的计算量，具有较高的计算效率。本设计使用 FDA Tool 与 Xilinx 提供的 FIR Compiler 7.2 构建半带滤波器。FDA Tool 设计半带滤波阶数 10，通带频率 25MHz，阻带衰减 65db，内插倍数为 2。

2.3.2 低通滤波模块

为了实现非整数倍的内插，在半带滤波器之后级联简单的低通滤波器，实现一定倍数的抽取，并滤除镜像。设计使用 FDA Tool 工具箱与 FIR Compiler 7.2 完成滤波设置。其中 FDA Tool 设计滤波器阶数 38，通带 25MHz，过渡带 25MHz，带外抑制 78db，带内波纹 0.01db。

2.3.3 CIC 滤波模块

CIC 滤波器是由积分与梳状滤波器级联的滤波器。由于其只使用加法器、减法器 and 寄存器，在算法中不需要乘法，因此降低了计算的复杂程度^[16]。单级的 CIC 滤波器阻带衰减差，设计使用多级 CIC 级联数的方式。然而，CIC 级联越多，其通带越不平缓，所以一般用于速率转换的最后一级。本设计使用 5 阶 CIC 滤波器级联的方式，其阻带衰减可达 66.8db，对前级信号进行 5 倍内插。

2.4 NCO 设计

NCO 是 DUC 过程中的关键仪器设备。为实现频谱的向上迁移，需要 NCO 提供载波信号，即产生频率可变的正弦或余弦样本。传统的 NCO 采用查表法，为了提高频率分辨率，通常需要提供大容量的存储器，这会造成更多的资源消耗。采用 CORDIC 算法以一定的相位步进进行多次迭代，将相位转化为正余弦幅值。该方法可以有效解决资源消耗大的问题。

3 结果与讨论

本系统中 FPGA 采用 50MHz 的输入时钟，经过锁

相环(Phase Locked Loop, PLL)将时钟倍频至 120MHz 和 400MHz, 作为 DDS 与 NCO 的工作时钟。数字射频信号在 ZYNQ SOC 芯片中实现正交 DUC 及脉冲波形的存储。系统通过 System Generator 设计的算法模型在 Simulink 环境下输入参数数据, 将生成的硬件语言文件载入 FPGA, 最后通过 FPGA 的集成逻辑分析器(Integrated Logic Analyzer, ILA)将输出的数字射频信号进行存储, 并导入 Matlab 进行实验结果显示。

3.1 DDS 与内插系统实验

实验对 DDS 与内插系统的效果进行验证, 设计 DDS 工作频率 120MHz, 输出频率 21.29MHz, 相位位宽 32 位, 通过计算输入相应的频率控制字, 得到经内插系统前后的信号波形, 如图 5 所示。通过分析信号波形可知, 频率为 21.29MHz 的 DDS 输出信号波形稳定, 发射频率控制效果良好。此外, 内插系统对信号波形的内插效果良好, 证明内插算法较为理想。

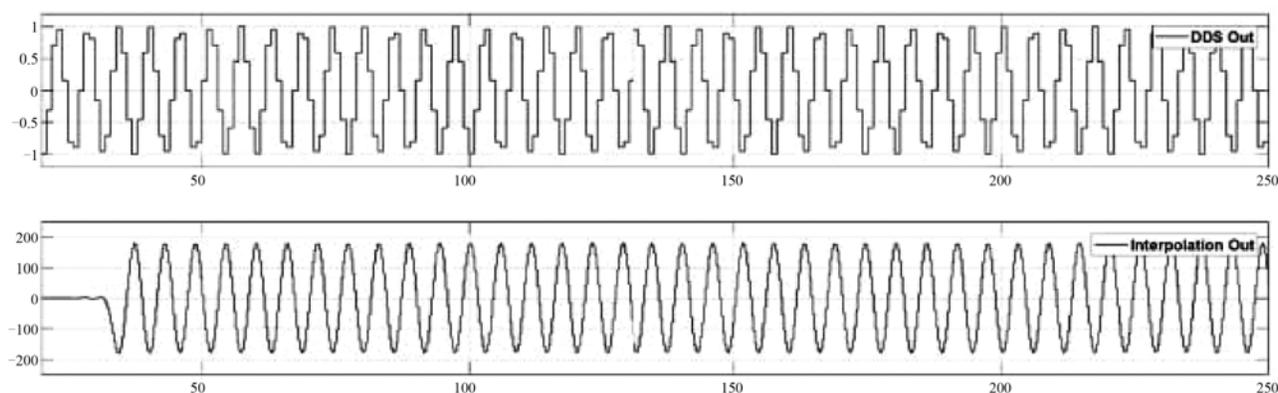


图 5 21.29MHz 数字信号内插效果

Fig.5 Interpolation effect of 21.29MHz baseband signal

3.2 脉冲调制与精度检测实验

实验 1: 对发射系统的硬脉冲控制效果与时间精度进行测试。设计通道一: 产生 1.5 T MRI 的 B1 场中心频率 63.87MHz 的数字信号; 通过 DDS、DSP、DUC 系统生成 63.87MHz 的硬脉冲, 脉冲时长 $2\mu\text{s}$, 采样率为 400MHz, 结果如图 6 (a) 所示。设计通道二: 对时间精度进行检测, 混频后得到 50MHz 数字射频脉冲, 脉冲时长 $0.2\mu\text{s}$, 结果如图 6 (b) 所示, 其实际长度大于

9 个周期, 实际时长 $0.18\mu\text{s}$, 表明时间精度在 $0.02\mu\text{s}$ 以下。由测试结果可知, 硬脉冲调制效果良好。

实验 2: 验证发射系统的软脉冲输出效果。设计通道分别输出不同频率的脉冲信号, 结果如图 7 所示。其中, 通道一依次输出 63.87MHz 的 3sinc 型软脉冲和 Gaussian 型软脉冲, 时长 $2\mu\text{s}$; 通道二输出 21.29MHz 的软脉冲, 时长 $2\mu\text{s}$ 。结果表明软脉冲输出效果良好(通道三、四脉冲输出结果同上)。

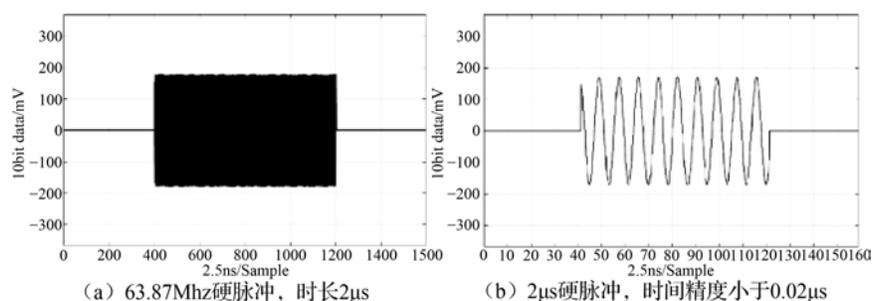


图 6 实验 1

Fig.6 Experiment 1

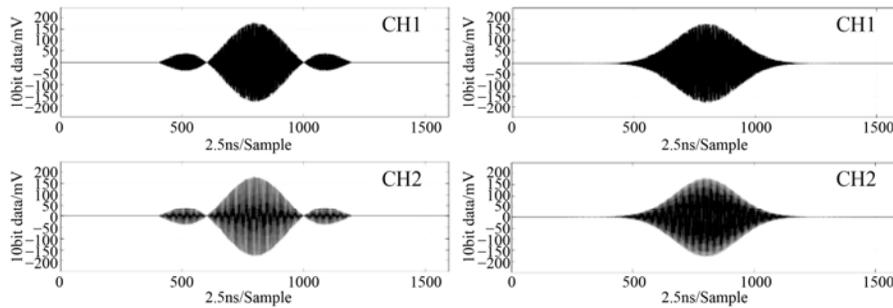


图 7 两路 63.87MHz、21.29MHz 的 3sinc 型软脉冲和 Gaussian 型软脉冲
Fig.7 Two channels 63.87MHz, 21.29MHz 3SINC type soft pulse and Gaussian type soft pulse

3.3 讨论

该系统使用 VIVADO 进行开发, 设计了 4 通道的 MRI 射频脉冲发生系统, 并对 4 通道系统实现后的资源使用状况进行分析, 项目工程名为 RF, 各逻辑资源块使用数量如表 1 所示。通过资源分析, 证明单板资源足以支持 4 通道的系统工作, 因其属于 Zynq-7000 系列最小型的版本之一, 相应地, 其所拥有的资源较少。对于 16 通道乃至 32 通道, 需要使用更高的版本或多个芯片来支持系统的运行。

表 1 资源分析结果

Tab.1 Results of Resource Analysis

名称	BRAMs (60)	DSPs (80)	LUTs (17 600)	Registers (35 200)
RF	32	60	5 054	7 283

4 结语

本文设计了一种多源数字化射频发射方法, 该方法应用 System Generator 开发软件, 以可视化编程的方式进行数字化开发。相较于现有的多源射频发射方法, 该方法运用数字调制技术, 通过软件编程设计 DDS、DUC、内插混频等系统, 避免了多片 DDS、DUC 专用芯片造成的硬件过于复杂的问题, 同时降低了数字化开发的难度, 加快了开发周期, 为 MRI 多源数字化射频方法提供了新的方案。

参考文献

[1] FENG K, HOLLINGSWORTH N A, MCDUGALL M P, *et al.* A 64-channel transmitter for investigating parallel transmit MRI[J]. *Transactions on Biomedical Engineering*, 2012, 59(8):2152-2160.
 [2] TWIEG M, GRISWOLD M A. High efficiency RFPA module for pTX at 3 T[J]. *Other*, 2017, 78(4): 1589-1598.
 [3] 李聿为. 高场磁共振成像多通道射频发生电路设计[D]. 北京: 北京

化工大学, 2016.

LI Yuwei. Design of multi-channel RF generation circuit for high-field magnetic resonance imaging[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016

[4] 飞利浦医疗保健事业部. 超高场磁共振的发展趋势——多源发射磁共振[J]. *中国医学影像技术*, 2011, 27(9): 19481950.
 PHILIPS HEALTHCARE DIVISION. Future of ultra high field MRI: MultiTransmit parallel RF transmission[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*: 2011, 27(9): 19481950.
 [5] 胡从云. 多源磁共振技术——21 世纪高场磁共振的发展方向[J]. *医疗卫生装备*, 2010, 31(6): 131-132.
 HU Congyun. Multi source magnetic resonance technology—the development direction of high field magnetic resonance in the 21st century [J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2010, 31(6): 131-132.
 [6] CHUN I Y, SONG N, LOVE D J, *et al.* Mean squared error based excitation pattern design for parallel transmit and receive SENSE MRI image reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2016, 2(4): 424-439.
 [7] 朱云峰, 何为, 何传红, 等. 基于数字调制技术的核磁共振射频脉冲发生器[J]. *波谱学杂志*, 2018, 35(3): 318-327.
 ZHU Yunfeng, HE Wei, HE Chuanhong, *et al.* A nuclear magnetic resonance radiofrequency pulse transmitter based on digital modulation technology[J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2018, 35(3): 318-327.
 [8] DE MENEZES N R, HERNANDEZ H D, CARVALHO D, *et al.* All-digital FPGA-based RF pulsed transmitter with hardware complexity reduction techniques[C]//2020 33rd Symposium on Integrated Circuits and Systems Design (SBCCI), 2020: 1-5.
 [9] 潘文宇. 一种新型 MRI 谱仪的设计及关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
 PAN Wenyu. Design and key technology research of a novel MRI

- spectrometer[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [10] 丁星火. 一种 2.5GHz 数字上变频器的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- DING Xinghuo. Design and implementation of a 2.5GHz digital upconverter [D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [11] 刘敏. 小型化核磁共振仪器的初步研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- LIU Min. Preliminary study on miniature NMR instrument[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
- [12] 刘颖, 范书斐, 宋明辉, 等. 基于 System Generator 的射频直接带通采样 MRI 信号接收方法[J]. **波谱学杂志**, 2019, 36(3): 278-287.
- LIU Ying, FAN Shufei, SONG Minghui, *et al.* An MRI signal receiving method based on radio frequency direct band-pass sampling with System Generator[J]. **Chinese Journal of Magnetic Resonance**, 2019, 36(3): 278-287.
- [13] 马月萍. 基于 FPGA 与 DDS 的磁共振成像射频脉冲发生器的研制 [D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- MA Yueping. Development of magnetic resonance imaging RF pulse generator based on FPGA and DDS [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [14] 赵茹砚. MRI 谱仪的序列控制与射频发生电路设计[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- ZHAO Ruyan. Sequence control and RF generation circuit design of MRI spectrometer [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [15] 胡玲. MIMO 发射系统中基于 System Generator 的数字中频系统的设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- HU Ling. Design of digital intermediate frequency system based on System Generator in MIMO transmission system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [16] ELAMARAN V, VAISHNAVI R, ROZARIO A M, *et al.* CIC for decimation and interpolation using Xilinx system generator[C]//2013 International Conference on Communication and Signal Processing, 2013: 622-626.