

基于 FPGA 和 DDS 的质子同步加速器共振慢引出信号源设计

童金^{1,2} 谷鸣¹ 袁启兵¹ 刘永芳¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 调研了最新质子同步加速器驱动信号源的生成方式及成功案例,提出了基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)与数字频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)搭建的三阶共振横向引出激励信号发生平台方案,详细阐述了平台硬件架构及软件设计。同时分析了频率合成中的几个关键点,模拟了经 1 kHz 数字低通滤波后的高斯噪声信号,修整了模拟输出通道的 7 阶 π 型巴特沃斯低通滤波器参数。激励平台实现了频率精度高、频率带宽设置灵活的频率信号源。实验数据测试表明,此平台所产生的频率信号能满足加速器慢引出信号源指标需求。

关键词 质子治疗装置, 数字频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS), 高斯噪声, 慢引出

中图分类号 TL82

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.040102

质子束流在人体组织内的剂量分布呈现 Bragg 峰特性,这比传统意义上的利用 X 或 γ 射线治疗体内癌症细胞具有更少的正常肌体损伤^[1],近 20 年来,质子治疗技术在发达国家发展迅速。上海联合投资有限公司、中国科学院上海应用物理研究所及上海瑞金医院正联合推进国内首台质子治疗装置的研制工作。本文重点关注装置中同步加速器驱动信号源产生机制。

从同步加速器存储环中引出用于癌症治疗的质子束流主要有两种方法:一是保持质子束流运行状态不变,逐步缩小由加速器 lattice 结构决定的稳定区域,使束流越出稳定边界,从而进入共振态;二是保持同步加速器的 lattice 参数不变,即加速器的稳定区域不变,改变束流运行状态 tune 值,实现共振。两种情况下的粒子进入共振态以后,其振幅均呈指数式增长,当振幅达到一定值就可以被切割器分离引出^[2]。

射频横向激励引出是一种典型的改变束流运行状态实现慢引出的方式,国内外的应用研究在不断发展完善。上海质子治疗装置也采用射频横向激励技术用于质子束流的慢引出,本文工作主要就是围绕该激励信号发生器的研制展开。

事实上,射频横向激励信号应设计为对应激励频率的调频调幅电场。调频的作用是使得储存环中

质子受到的影响各有差异,使得质子群尽量均匀地进入共振态,起到对稳定区内质子工作点的涂抹作用,改善溢出束流的微观时间结构;调幅的作用是调节引出束流的宏观流强,提供流强的设定、前馈和反馈等稳流通道^[3]。一定范围内,电场峰值越大则引出束流越强。引出系统的设计框图如图 1 所示。

根据上海质子治疗装置同步加速器物理设计参数,加速器环周长 R 为 28.4 m,注入能量为 7 MeV,引出能量范围为 70–250 MeV,引出工作点 $\text{tune}=[1.663\ 0, 1.394\ 0]$,共振工作点 $\nu=5/3$,回旋频率 f_{rev} 为 3.175–4.030 MHz^[4]。射频横向激励信号频率和调制宽度按照如下关系变化:横向激励频率 $f_k=0.663 \times f_{\text{rev}}=(2.105\text{--}2.672)\text{ MHz}$,其中,0.663 为引出工作点横向分量的小数部分。

储存束流有一定的能散($\Delta p/p$),即质子有一定的 betatron 频率分布。粒子从稳定区中心扩散到稳定区边缘, betatron 频率也随着改变。激励频率需覆盖储存粒子的 betatron 频率到共振频率的范围,进而驱使稳定区内的粒子振幅增大进入共振状态引出,因此横向激励频率需满足一定的调制带宽。

激励频率调制带宽 $\Delta f_k \approx 0.003\ 6 \times f_{\text{rev}}=11.43\text{--}14.51\text{ kHz}$,其中,0.003 6 为共振工作点与引出工作点横向分量差值。

第一作者:童金,男,1988 年出生,2011 年毕业于华中师范大学,现为硕士研究生,专业信号与信息处理

通讯作者:谷鸣, E-mail: guming@sinap.ac.cn

收稿日期:2014-01-14, 修回日期:2014-03-21

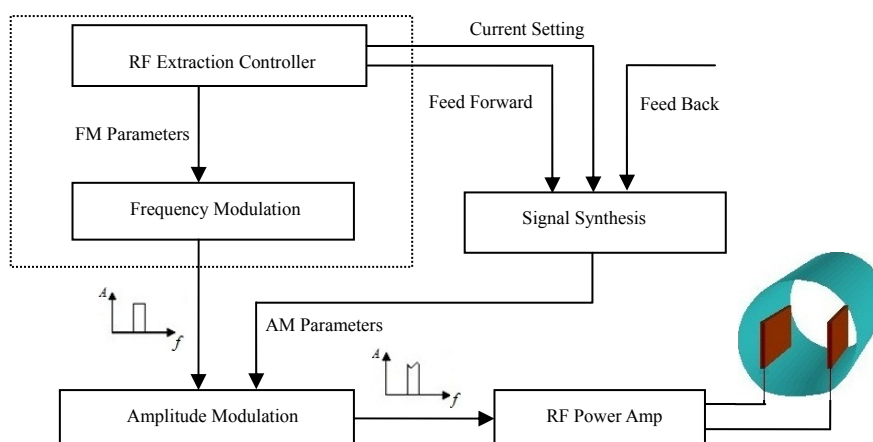


图 1 射频横向激励信号系统设计框图
Fig.1 Block diagram of the RF slow_extraction signal.

本文重点关注激励频率信号的发生方法与具体实现。具体来说,是要产生中心频率(MHz 量级)和带宽(kHz 量级)均在线可调的信号源作为激励信号。上海质子装置设计采用在设定带宽内频率随机变化的信号作为激励源。

1 质子同步加速器共振慢引出信号源方案选择

前文已经确定了激励信号的调频部分参数,回归到电子学,需要研制能产生满足条件的信号发生平台,首先需要确定的是信号源系统的方案选择。

1.1 基于压频转换器件的信号源方案

首先考虑压控晶体振荡器 VCXO、压控振荡器 VCO 及 V/F 电压频率转换器等模拟压频转换器件用于频率信号合成,但这些方案存在模块众多且多为模拟电路,易受干扰,系统精度不易控,频偏较大等突出问题。

1.2 基于直接数字频率合成器的信号源方案

考虑到模拟调制方案中存在诸多弊端,采用直接数字频率合成技术用于信号源合成。这是一种全数字化方式,直接数字频率合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)的原理框图如图 2 所示。

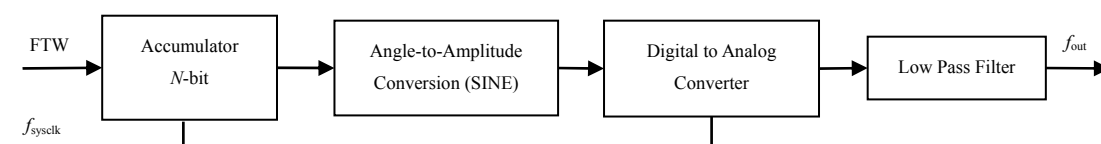


图 2 DDS 原理框图
Fig.2 Theoretical diagram of direct digital frequency synthesis.

图 2 中相位累加器(Accumulator)可在每个时钟上升沿将频率控制字决定的相位增量累加一次,正弦查询表用于实现从相位累加器输出的相位值到正弦幅度值的转换,后续 DAC 将数字量化正弦幅度值转变为模拟量,最后由低通滤波器输出纯净的正弦信号。图 2 中, f_{out} 为输出信号的频率, f_{sysclk} 为系统时钟频率, N 为累加器的位数, FTW (frequency turn word)是频率控制字。

一般情况下有:

$$f_{out} = \frac{FTW \times f_{sysclk}}{2^N} \quad (1)$$

当 FTW 取 1 时:

$$f_{out_min} = \frac{f_{sysclk}}{2^N} \quad (2)$$

为该 DDS 的频率分辨率。当 f_{sysclk} 为 100 MHz 且累加器位数为 32 位时,分辨率为 0.023 3 Hz,可见频率精度很高。

图 3 展示的是基于 FPGA 和 DDS 的信号源系统方案。FPGA 对 DDS 配置控制高精度频率信号输出;同时, FPGA 内部 PLL 生成高稳定度参考频率提供给 DDS 作为时钟频率。随机信号的产生是为了保证频率变化的随机性。该方案的优点在于 FPGA

编程即可灵活实现诸如锯齿波调制、正弦波调制等多种调制方式且 DDS 输出频率精度很高。缺点在于 DDS 合成需求频谱成分时会产生很多高频镜像谐波干扰^[5]，必须设计相应的低通滤波器予以阻隔。

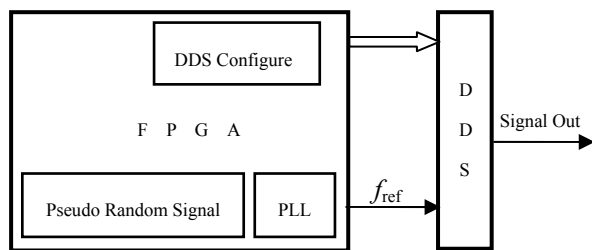


图3 基于直接数字频率合成器的频率调制方案
Fig.3 Scheme based on direct digital frequency synthesis.

2 基于 DDS 的信号发生

图3方案中，FPGA用于对DDS模块的控制和配置，而DDS模块则用于产生高精度的频率信号。考虑到在板资源及接口拓展等方面的因素，FPGA开发板选择Altera公司的DE2-115，其核心芯片为Cyclone IV系列的EP4CE115F29，主时钟为50 MHz；DDS则选用ADI公司的直接数字频率合成器评估板AD9910/PCBZ。

2.1 FPGA与DDS板间通信控制

AD9910确定选取单频调制模式，且两板之间采用SPI通信协议进行通信^[6]。DDS开发板中有SPI通信接口，FPGA开发板可用GPIO口模拟SPI通信口。

AD9910串行端口是一种灵活的同步串行通讯端口。此接口可进行读/写操作，访问所有AD9910配置寄存器。我们选用简便的2线SPI通信模式，仅需设置AD9910中地址为0X00的控制功能寄存器1(CFR1)的bit1位为0即可。其工作时序如图4所示。

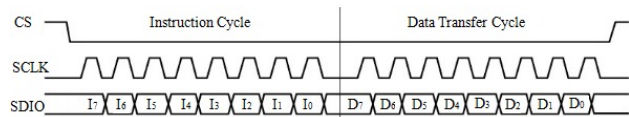


图4 FPGA与DDS板间通讯时序
Fig.4 Time sequence for communication between FPGA and DDS.

选定DDS的外部参考频率 f_{sysclk} 为100 MHz，确定FPGA与DDS的通信控制流程如下所述：

(1) 首先对DDS初始化，M_RST高电平主机复位将所有寄存器恢复默认值；然后设置Profile 0~2为000选定单频模式下的profile0。

(2) CS使能令串口传输端口有效，设置CFR1为0X0041_0000，即令反SINC滤波器有效和选择DDS正弦输出，同时配置SDIO引脚为双向操作且串行I/O端口为MSB格式优先。

(3) 根据式(1)中输出频率与系统时钟频率及频率控制字的关系，推算出输出2 MHz正弦信号对应的频率控制字为0X051EB852；以此类推，可以推算出其他频率点所对应的频率控制字；将不同的频率控制字依次写入串行端口缓冲器。

(4) 利用IO_UPDATE信号将当次所写频率控制字推送至有效寄存器，若已完成所有写操作，退出返回；否则，进入(3)继续执行。

按照此工作流程，在Quartus II编程环境中，结合有限状态机思想，利用Verilog HDL语言编写软件代码，调试成功并定义好引脚文件后，下载至FPGA开发板运行，生成的模块设计文件如图5。

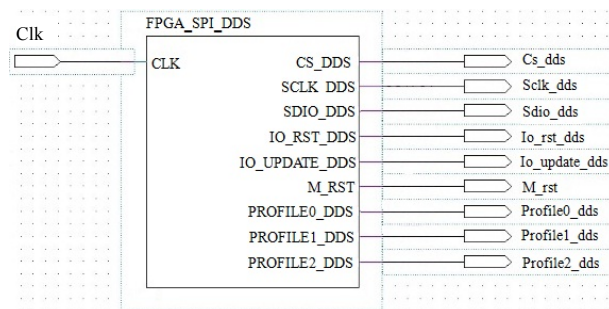


图5 DDS控制器的模块化框图
Fig.5 Block design file of the DDS controller.

2.2 带限随机信号的生成与应用

方案中涉及到随机信号生成的问题，这主要是因为规则频率扫描和多路规则频率合成激励引出时，均会存在一个固有的干扰频率^[3]，而采用伪随机信号可以消除这种干扰。系统输出频率点虽在一定范围内随机变化，但其频率变化不能太快，应尽可能“柔和”，保证在1 kHz频带范围内。一个高斯白噪声经过1 kHz截止频率的数字低通滤波器（双线性Z变换）后的频谱变得平滑。实际编程中采用的是用伪随机序列代替高斯噪声，均值滤波简化替代数字低通滤波器。

2.3 输出信号平滑滤波

DDS 输出有高频镜像谐波且频率变化容易产生高频干扰, 所以 AD9910/PCBZ 开发板信号输出通道设计有截止频率为 400 MHz 的 7 阶 π 型巴特沃斯低通滤波器。但本系统涉及的最高频率仅为 2.67 MHz, 远低于原设计截止频率值。为了更精确地获得输出信号, 我们重新设计了 AD9910/PCBZ 开发板上无源低通滤波电路参数, 使其 3 dB 截止频率为 6 MHz, 使输出端口的谐波成分得到最大程度的抑制从而保证信号质量。

2.4 信号生成与评价

综合考虑前述关键点, 基于 DE2-115 与 AD9910/PCBZ 开发平台, 利用 FPGA 内部 PLL 提供 100 MHz 精准频率作为 DDS 系统时钟频率, 向 profile0 的写入频率控制字 0X06C8_B439, 对应频率值 2.65 MHz, 观察 Agilent 4395A 频谱仪中信号输出, 可以看到一个高稳定度的 2.65 MHz 正弦波信号。图 6 即为输出信号的频域图, 从图 6 中可以看出, 在 2.65 MHz 的标记点, 信号质量好于 80 dB。

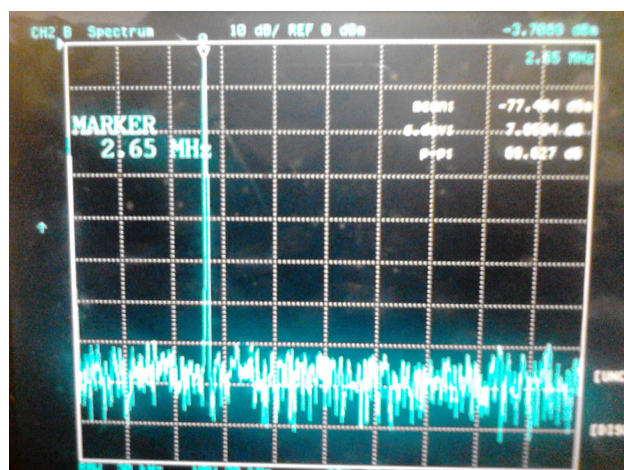


图 6 FPGA 控制 DDS 信号合成实测图
Fig.6 Frequency signal with DDS controller.

同样的, 在 FPGA 的频率合成控制下, 将频率控制字 0X05638866-0X06D71F37 随机地向 profile0 写入, 并不断用 IO_UPDATE 信号将其推送至有效寄存器。

同样用 Agilent 4395A 频谱仪观测信号输出, 可以观察到图 7 的输出调制范围为 2.105-2.672 MHz 的频率信号。简单分析可知, 频率控制字 0X05638866-0X06D71F37 就实现了目标频率的全覆盖。

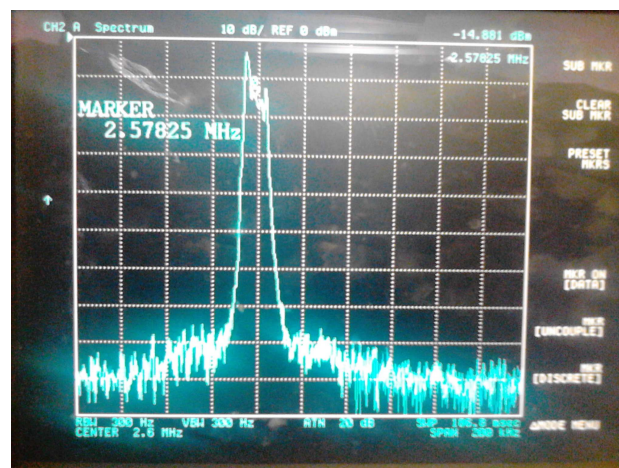


图 7 一定调制带宽的信号源实测图
Fig.7 Frequency signal with a setting bandwidth.

3 结语

利用 FPGA 和 DDS 搭建驱动信号发生平台, 实现了高精度且调制带宽设置灵活的频率信号源。在实现高精度单频信号的基础上, 合理调整输入频率控制字 FTW 的内容, 即可得到带宽调制信号源。以上阐述的只是调频信号的产生机制。事实上, 调幅信号也是可以由控制 AD9910 中地址为 0X09 的 14-bit 振幅比例因子寄存器实现。该调频调幅信号再经放大成为峰峰值为 600 V, 3 dB 带宽为 6 MHz 的功率信号, 即可驱动存储环中的 Kicker, 实现质子束流慢引出。由输出结果可以看到, FPGA 在控制上展现了很大的灵活性, 而 DDS 在信号质量上很有优势。

参考文献

- Tomizawa M, Yoshizawa M, Chida K, *et al.* Slow beam extraction at TRAN II[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1993, **326**(2): 399-406
- 丁小平, 王书鸿, 韩谦. 小型医用质子同步加速器的慢引出设计[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(1): 88-93
- DING Xiaoping, WANG Shuhong, HAN Qian. Design of vslow extraction for a small proton therapy synchrotron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, **10**(1): 88-93
- Node K, Furukawa T, Shibuya S, *et al.* Advanced RF-KO slow-extraction method for the reduction of spill ripple[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, **492**(3): 253-263
- 史丹, 欧阳联华, 谷鸣. 上海质子治疗装置慢引出 RFKO 研究[J]. 核技术, 2012, **35**(3): 231-235
- SHI Dan, OUYANG Lianhua, GU Ming. The

- RF-knockout slow-extraction for Shanghai proton therapy facility[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(3): 231–235
- 5 樊世杰, 蔡飞, 范红旗, 等. 基于 AD9910 的调频非线性步进信号生成方案[J]. 雷达科学与技术, 2011, **9**(1): 77–83
- FAN Shijie, CAI Fei, FAN Hongqi, *et al.* Scheme for nonlinear stepped-frequency chirp signal generation based on AD9910[J]. Radar Science and Technology, 2011, **9**(1): 77–83
- 6 杨小勇, 毛瑞娟, 许林华. 基于 FPGA 的 AD9910 控制设计[J]. 电子设计工程, 2011, **19**(2): 150–153
- YANG Xiaoyong, MAO Ruijuan, XU Linhua. Control design of AD9910 based on FPGA[J]. Electronic Design Engineering, 2011, **19**(2): 150–153

Design of slow-extraction signal source within proton-synchrotron based on FPGA&DDS

TONG Jin^{1,2} GU Ming¹ YUAN Qibing¹ LIU Yongfang¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: Proton has a higher precision in cancer treatment than traditional X or γ radiation because of its Bragg peak feature. Shanghai Institute of Applied Physics is participating in the development of the first proton therapy facility of China. **Purpose:** Stable and adjustable proton beam extraction is one of the key points of the project. The aim of this work is to design high resolution frequency signal source for slow beam extraction. **Methods:** A fully digital signal source platform is implemented using FPGA developing board DE2-115 and Direct Digital Synthesizer (DDS) board AD9910/PCBZ. The communication between DE2-115 and AD9910/PCBZ is realized *via* SPI interface with Verilog HDL programming. **Results:** High accuracy and flexible frequency signal is obtained through the platform and visualized clearly by oscilloscope and spectrometer, despite a little harmonic. **Conclusion:** The preliminary results show that scheme design of the project is reasonable and meets the needs of demands although many aspects of the scheme have to be improved further.

Key words Proton therapy, Direct Digital Synthesizer (DDS), Gaussian noise, Slow-extraction

CLC TL82