

MRI용 고속 디지털 모뎀의 송신기 설계

양문환¹, 염승기¹, 김대진¹, 정관진^{*}, 최윤기^{*}, 김용권^{*}, 권영철^{*}
¹진남대학교 전자공학과, ^{*}(주)메디다스
 전화 : (062) 530-0758 / Fax : (062) 530-1759

Design of Transmitter in High-Speed Digital Modem for MRI

Moon Hwan Yang¹, Seung Gi Yeom¹, Dae Jin Kim¹,
 Kwan Jin Jung^{*}, Yun Kee Choi^{*}, Yong Gwon Kim^{*}, Young Cheol Kwon^{*}
¹School of Electronic Engineering, Chonnam National University,
^{*}Medidas Co.
 E-mail : u9997211@chonnam.chonnam.ac.kr

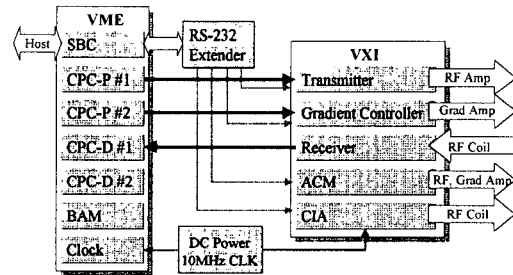
※ 이 연구는 (주)메디다스의 지원에 의한 보건복지부 G7 위탁과제의 연구결과입니다.

Abstract

In tendency of digitalization, we studied about the purpose of digital modem for MRI spectrometer and advantage of digital modem compared with analog one. We introduce requirements for designing transmitter of high speed digital modem for MRI spectrometer. We also introduce its top-level and mid-level architecture. The transmitter is composed of CPC-P interface block, DUC & DAC block, RF block, master clock generation block, MCU block. Especially, DUC and its control parts are studied in detail. DUC and DAC can operate up to 52MHz and 100Msps, respectively. However we uses 35MHz as master clock and this paper shows its validity through simulations.

I. 서론

최근에 의학과 생체의료공학의 발달과 더불어 MRI와 같은 의료장비의 발달도 활발히 진행되고 있다. 또한 디지털화에 발맞추어 MRI장비도 디지털화가 진행되고 있다. 본 논문은 MRI용 디지털 모뎀에서 송신기의 요구사항과 이에 따른 각 부분의 설계방법, 그리고 각 블록의 구성도를 소개한다. MRI 스펙트로미터의 전체구조는 <그림 1>에서와 같이 크게 VME와 VXI로 이루어져있다. 호스트에서 명령을 보내면 SBC보드와 CPC-P보드를 거쳐 필요한 데이터를 송신부로 보



<그림 1> MRI Spectrometer의 전체 구조

낸다. 송신부는 CPC-P보드에서 오는 RF 펄스를 변조하여 RF Amp를 거친 후 RF 코일로 보낸다. 수신부에서는 코일에서 가져온 NMR신호를 복조하여 CPC-D 보드로 보내 호스트에서 MRI 영상을 볼 수 있다.

VME(Versa Modular Europe)의 각 부분의 역할은 다음과 같다.

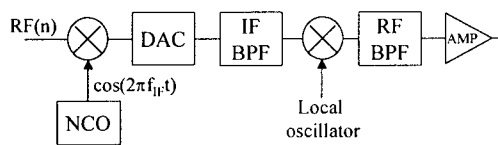
- SBC : 호스트와의 인터페이스를 담당하고 펄스(pulse) 프로그램과 파라미터를 불러온다.
- CPC-P : RF펄스와 그래디언트 필요한 디지털 파형을 발생하여 송신기와 Gradient Controller에 전송한다.
- CPC-D : 수신기로부터 오는 NMR 데이터를 획득하고 2차원 푸리에변환에 의해 영상을 복원한다.
- Clock : CPC-P보드 및 다른 보드에서 사용하는 10MHz 기본클럭을 발생하여 공급한다.

VXI(VMEbus eXtension for Instrument)는 송신부

(Transmitter), 수신부(Receiver), Gradient Controller, ACM, CIA 등으로 구성되는데, 디지털 모뎀은 VXI의 송신부와 수신부로 구성되며 송신부는 2단계 진폭변조 (Amplitude Modulation ; AM)를 한다. MRI에서 영상을 얻기 위해 RF 펄스를 만들어 주는 변조와 RF 코일에서 획득된 영상을 복조하는 기법은 기본적으로 정현파 반송파 변복조방식을 이용한다. MRI용 디지털 모뎀의 변복조 목적은 채널을 통한 RF신호의 전송보다는 MRI 시스템의 RF코일에 그라디언트를 걸 때 필요한 자장세기만큼 주파수 변환이 필요하기 때문에 AM 변조가 필요하고, 또한 디지털 RF 펄스신호를 아날로그 RF 펄스신호로 변환하는 DA변환이 필요하게 된다.

변복조 회로가 아날로그 부품이나, 디지털 부품이냐에 따라 아날로그 모뎀과 디지털 모뎀으로 나눈다. 기존 아날로그 모뎀은 캐리어 주파수의 가변성에 따라 캐리어 주파수 가변형과 캐리어 주파수 고정형 아날로그 모뎀으로 구분하고, 2단 주파수 변환형 아날로그 모뎀의 경우 2차 국부발진주파수를 고정한다. 최근에는 송,수신기의 정교한 주파수 조절, 변복조의 정확한 위상 조절, 하드웨어의 간편성, 저주파 외부진원 잡음 차단용이, VLSI화의 용이등의 이유로 디지털 모뎀을 많이 사용한다.

디지털 MRI 모뎀의 송신기 구조는 <그림 2>와 같다. 1차변조는 NCO를 이용하여 주파수와 위상을 정교하게 조절할 수 있고, 디지털로 구현이 가능하다. 2차 변조는 국부발진기를 이용하여 고정된 주파수를 발생시킨 후 혼합기(mixer)를 통해 AM변조를 한다.



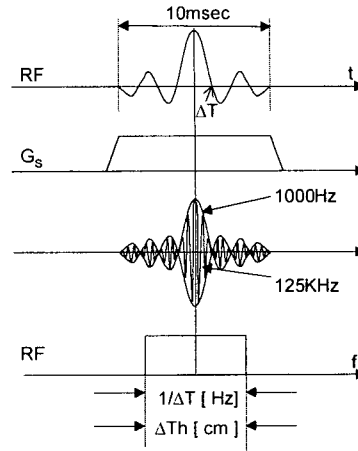
<그림 2> 디지털 MRI 모뎀의 송신기 구조

II. MRI용 디지털 모뎀 송신부의 요구사항

디지털 모뎀의 송신기 사양을 결정하는데 다음 사항을 우선적으로 고려해야 한다. 첫째 최신 영상 기법을 적용할 수 있도록 RF 주파수 범위가 충분할 것, 둘째 파형 해상도가 충분할 것, 셋째 주파수, 위상 해상도가 충분할 것, 넷째 3.0T이하의 모든 자장세기, 모든 원소에서 작동하도록 주파수 합성기 사용할 것, 마지막으로 동일한 BPF를 사용할 수 있도록 IF를 고정할 것이다.

▶ RF 주파수 범위 [1]

RF펄스 폭이 $1/\Delta T$, 두께가 ΔTh , 그리고 슬라이



<그림 3> 선택 그라디언트와 주파수 오프셋

스 오프셋이 S_{offset} 일 때 선택 그라디언트(Selection gradient)의 크기

$$G_s = 1/(\Delta T \cdot \Delta Th) \text{ [Hz]} \dots\dots\dots(1)$$

이고, 주파수 오프셋

$$f_{offset} = S_{offset} / (\Delta T \cdot \Delta Th) \text{ [Hz]} \dots\dots\dots(2)$$

이다. 예를 들어 ΔT 가 1msec, $\Delta Th = 0.2\text{cm}$, $S_{offset} = 25\text{cm}$ 이라면, $f_{offset} = 125\text{KHz}$ 이므로 송신 주파수를 RF 주파수에서 $\pm 125\text{KHz}$ 까지 조절할 수 있어야 하며 BPF가 중심으로부터 $f_{offset} + 1/2 \Delta T$ 이므로 $125\text{KHz} + 500\text{Hz} = 125.5\text{KHz}$ 가 된다.

실제적인 RF 주파수 범위는 $\pm 250\text{KHz}$ 이고 RF 밴드폭은 ^1H 의 경우 0.5dB에서 500KHz이다.

▶ 파형 해상도

파형 해상도는 DAC의 비트 수와 관계된다. DAC의 비트수가 많을수록 디지털 신호를 정확하게 아날로그 신호로 변환할 수 있기 때문이다. MRI 송신기에서는 14bit의 DAC를 사용하고, 수신기에서는 16bit ADC를 사용하여 파형을 정밀하게 변환할 수 있도록 했다.

▶ 주파수와 위상 해상도

주파수와 위상의 해상도는 DUC에 있는 NCO (Numerically Controlled Oscillator)에 의해 좌우된다. NCO에는 위상 누적기가 있는데 여기에 입력되는 주파수와 위상 정보가 누적되게 된다. NCO의 주파수 출력이 정교하기 위해서는 주파수와 위상의 해상도가 높아야 한다. NCO는 32비트의 주파수해상도와 16비트의 위상해상도를 갖는다. 따라서 35MHz 클럭을 사용할 경우 $35\text{M}/2^{32} = 0.008\text{Hz}$, $360/2^{16} = 0.0055^\circ$ 로써 MRI 영상을 지원하기에 충분한 해상도를 갖추게 된다.

▶ 주파수 합성기 사용

0.3T, 1.0T, 1.5T, 3.0T의 모든 자장과 모든 원소 (^1H , ^{23}Na , ^{31}P , ^{13}C)에서 작동하기 위해서는 각 자장과 각 원소에 따라서 자동적으로 주파수를 가변할 수 있

는 주파수 합성기가 필수적이다. 이 송신기에서는 10MHz에 동기되어 클럭을 생성하고, 160MHz까지 출력 주파수를 생성시킬 수 있으며 거의 0 ppm 클럭 에러를 가진 주파수 합성기를 사용한다.

▶ 고정된 중간주파수(Intermediate Frequency;IF)

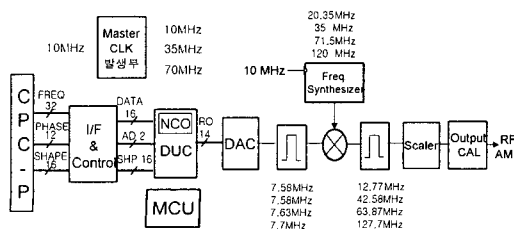
주파수 합성기에서 가변적으로 주파수를 생성하는 것은 결국 고정된 중간주파수를 얻기 위해서이다. 각 자장의 세기에 관계없이 NCO에서 평균적으로 7.58MHz의 일정한 IF를 발생시키면 주파수 합성기에서 각 자장에 필요한 주파수로 변조해 주게 된다. 이렇게 되면 수신단에서는 복조 이후에 7.58MHz의 고정된 중간주파수를 받아들일게 되고 결과적으로 BPF도 하나만 필요하게 된다. 여기서 VCO (Voltage Controlled Oscillator)를 이용하는 주파수 합성기는 미세 조정이 어려우므로 NCO에서 미세한 주파수 조정이 이루어진다.

<표 1> MRI용 디지털 모뎀의 송신기 요구사항[2]

Center Frequency (1H)	자장		
	0.3T	1.0T	1.5T
	20.35MHz	35 MHz	71.5MHz
	12.77MHz	42.58MHz	63.87MHz
	120 MHz	127.7MHz	
Maximum Amplitude	± 1 dBm into 50 ohm		
Frequency range	± 250 KHz		
Frequency resolution	$35\text{MHz}/2^{32} = 0.008\text{Hz}$		
Phase resolution	$360/2^{10} = 0.0055^\circ$		
AM bandwidth	BPF의 0.5dB BW = 500KHz		
IF bandwidth	740 KHz		
RF bandwidth	500 KHz, 1.8 MHz for 13C		
AM resolution	16bit, $2^{-16} = 0.0015\%$		
Harmonics	-40 dBc		
Spurious	-30dB down from -40dB output amplitude		
Gate On/Off ratio	100 dB		
DAC bit 수	14 bit		

III. 송신기 전체 구조 설계

<그림 4>는 고정 클럭을 이용한 송신기의 전체 블록도를 보여주고 있다. CPC-P로부터 공급되는 각 데이터는 인터페이스에 의해 각 주소로 디코딩되고 해당주소에서 각 데이터처리에 맞게 처리되어 각 블록

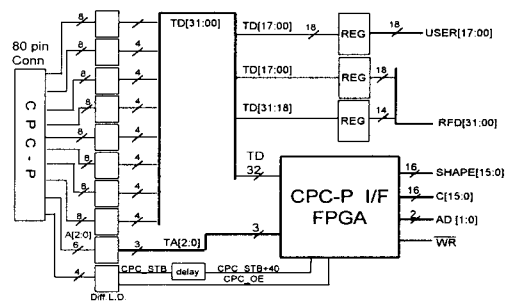


<그림 4> 송신기의 전체 구조

으로 입력된다. 송신기는 NCO와 곱셈기를 원칩 DUC로 구현하였고, NCO와 RF 펄스신호 각각 16bit를 곱해 변조된 16비트의 출력 데이터를 발생한다. 이 중 14비트가 DAC를 거친 후 IF용 BPF를 통과한다. 이 신호는 3.0T 이하의 모든 자장에 해당하는 주파수로 변조 후 각각의 주파수에 맞는 RF BPF를 거친 후 송신 신호 크기를 조절 할 수 있는 감쇄기를 거친 다음 RF 앰프로 출력된다.

▶ CPC-P 인터페이스 블록

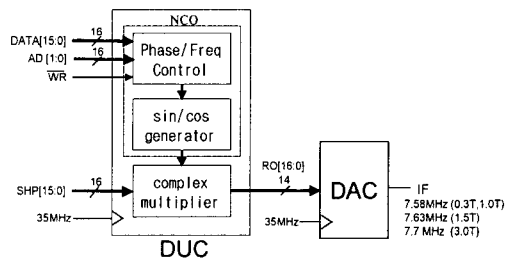
CPC-P에서 입력되는 35비트 명령어들은 MSB 3비트에 의해 디코딩된다. 라인드라이버에 의해 입력되는 데이터들이 저장되었다가, 인터페이스 FPGA에 의해 FREQ, PHASE, SHAPE등의 데이터는 각 주소에 적합한 형태로 제어된다. USER와 수신기로 전달되는 RFD는 레지스터에 저장했다가 출력된다. 특히 FREQ와 PHASE 정보는 DUC의 NCO에 공급되기 위해 다중화되었다가 C 16비트로 출력된다.



<그림 5> CPC-P 인터페이스 블록도

▶ DUC & DAC 블록

NCO(Numerically Controlled oscillator)와 곱셈기를 원칩으로 통합한 DUC와 DAC로 구성된다. NCO에서 발생하는 16비트 코사인 파형 데이터와 16비트의 RF 펄스 파형을 곱하여 16비트의 변조된 데이터를 출력한다[3]. DUC는 위상 주파수 제어부(PFCS)와 Sin/Cos부, 그리고 곱셈기로 구성된다[4]. DAC는 14비

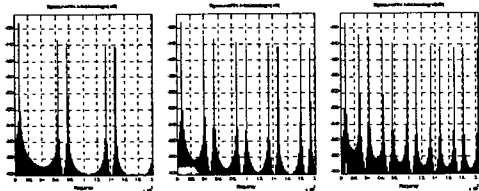


<그림 6> DUC & DAC 블록도 [5]

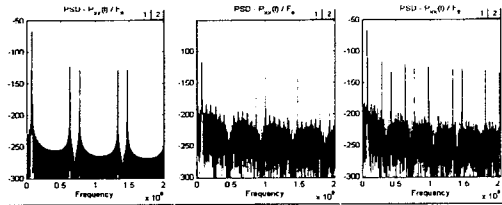
트이고 최대 동작 클럭 주파수는 100 MSPS이며 DUC의 최대 동작 클럭 주파수는 52 MHz인데[6], 클럭 주파수를 35MHz를 사용하여 성능의 지장없이 적당한 주파수로 해상도를 높일 수 있음을 모의실험을 통해 검증했다.

▶ DUC와 DAC 동작주파수 영향분석 모의실험

중간주파수 7.58MHz로 변조 된 RF 펄스는 DAC를 거쳐 BPF로 필터링 되는데 BPF특성은 0.5dB 통과대역이 ±250KHz이다. 클럭속도에 따라 신호 성능을 스펙리얼스 정도를 파악함으로써 비교하였다. DUC와 DAC의 동작 주파수로 70MHz, 48MHz, 35MHz의 세 가지 경우를 사용하고, 필터를 통과하기 전과 후의 스펙리얼스를 비교하였다. 필터링 이전의 스펙리얼스는 주파수가 낮을수록 부엽(side lobe)의 신호가 크게 발생하지만 필터링 이후에는 주파수에 관계없이 일정하게 감쇄됨을 알 수 있다.

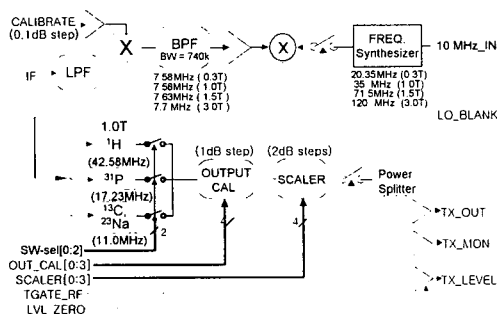


a) 필터링 이전의 스펙리얼스(70, 48, 35MHz)



b) 필터링 이후의 스펙리얼스(70, 48, 35MHz)

<그림 7> DUC와 DAC 동작주파수 영향분석 모의실험



<그림 8> RF 블럭도

▶ RF block

각 자장세기에 맞게 주파수 합성기에 의해 생성된 각 주파수는 중간주파수(IF)와 혼합된다. 이 2차 중간주파수는 각 자장세기에 따라 BPF를 통과하고, 1dB 간격의 16dB Output CAL과 2dB간격의 32dB Scaler로 이득을 조절한 다음 RF 앰프로 출력된다.

IV. 결론 및 추후 연구

본 논문은 최신 영상 기법을 구현 할 수 있는 MRI용 디지털 모뎀의 송신기 상세사양을 결정하였고 이에 따라 송신기를 설계하였다. NCO와 곱셈기를 원칩 DUC로 통합하고, 인터페이스와 제어블럭들을 FPGA로 통합하여 회로를 간소화하였으며 DUC에서 35MHz 클럭을 사용하여 주파수 해상도를 향상시켰다.

¹H, ²³Na, ³¹P, ¹³C용 RF BPF를 스위칭 방식으로 자동 제어가 가능하게 하였다. 14비트 DAC를 사용하여 파형 해상도를 높이고 변조용 국부발진 주파수를 주파수 합성기를 이용하여 설계하여 3.0T이하 모든 자장, 모든 원소에서 사용 가능하게 하였다. 또한 중간주파수를 고정하여 BPF를 줄였다.

스펙트로미터와 통합 실험을 위해 송신부와 수신부를 한 세트로서 해서 1차적으로 PC 인터페이스를 이용한 루프백 테스트를 수행하고, 최종적으로 스펙트로미터의 인터페이스 사양에 맞게 구현해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 정광우, 강형근. "MR 펄스파형의 이해", 대한자기공명의과학회지-2권 1호, 1998.06, Page(s): 1-13.
- [2] Elscint MR, Inc. "Otsuka Console Manual", 1996, Hardware manual, Page(s): 24-26.
- [3] Chester, D.B. "Digital IF up conversion for economical wireless implementations", Southcon /96. Conference Record, 1996, Page(s): 86-91.
- [4] Data Sheet, <http://www.intersil.com>, "HSP45116A - Numerically Controlled Oscillator/ Modulator (17 Pages) FN4156.3" April 1999.
- [5] Application note, <http://www.intersil.com>, "Digital IF Subsampling Using the HI5702, HSP45116 and HSP43220 (5 pages) AN9509.2" April 1999.
- [6] Data Sheet, <http://www.intersil.com>, "14-Bit, 100 MSPS, High Speed D/A Converter (14 pages) FN4071.6" 1999.