

근거리 무선 전력 전송을 위한 평형 증폭기 구조의 10MHz 10W급 전력원 설계

논 문
61-3-14

Design of the 10MHz and 10W Power Source for Short Distance Wireless Power Transmission

박 동 훈* · 김 귀 성** · 임 은 천*** · 박 혜 미*** · 이 문 규†
(Dong-Hoon Park · Gui-Sung Kim · Eun-Cheon Lim · Hye-Mi Park · Moon-Que Lee)

Abstract - In this paper, we have designed and manufactured 10MHz power source for the application of short distance wireless power transmission. The designed power source consists of a DDS(direct digital synthesizer) signal generator, a buffer driver and a balanced power amplifier. Short range wireless power transmission is usually carried out by near-field inductive coupling between source and load. The distance variation between source and load gives rise to the change of load impedance of power amplifier, which has effect on the operation of power amplifier. To overcome this problem due to load variation of power amplifier, we have adopted the balanced power amplifier using the quadrature hybrid implemented by lumped capacitors and a mutually coupled coil. The experiment results show the above 40dBm output power, frequency range of 9 to 11MHz, and total DC power consumption of 36W.

Key Words : WPT(Wireless Power Transmission), Balanced Amplifier, PA(Power Amplifier)

1. 서 론

최근 스마트폰의 보급률 증가와 함께 다양한 모바일 정보 통신 기기의 사용량이 크게 증가되고 있다. 모바일 전자제품의 전원의 공급은 배터리를 이용하여 공급하며, 배터리의 용량의 한계로 기기 사용 중의 충전은 전원 플러그 근처에서 유선으로 하는 단점을 가지고 있다. 유선 전원공급은 제한된 전원 플러그 수로 인해 멀티탭 등을 이용하여 전원플러그를 다중으로 묶어 사용하고 있으며, 전원 플러그 주변을 혼잡하게 만들어 화재의 위험 발생 요인이 되기도 한다. 최근에는 유선을 이용하여 배터리를 충전하는 기존의 방법 대신 이동 중이나 정지 중에 전력을 무선으로 받아 쓸 수 있는 무선 전력 전송(WPT, Wireless Power Transfer)이 모바일 기기의 전원 공급 방법으로 활발히 연구되고 있다. 무선 전력전송 기술은 전력 에너지를 무선으로 전송에 유리한 마이크로파로 변환하여 에너지를 전달하는 방식으로 전원선 없이 전기에너지를 공간을 통해 보내는 것으로 보통의 통신이 반송파 신호에 신호를 실어 보내는 것이라면 무선 전력 전송은 반송파만을 보내는 원리이다.[1] 무선 전력전송 기술은 전기 에너지를 무선으로 전달하여 전자기기의 이동성을 확보하고, 혼잡한 전원 플러그 주변 문제를 해결할 수 있

다.[2] 또한 친환경 전기교통분야, 모바일 기기, 각종 로봇과 의료분야등에 활용될 수 있는 기술이다. 본 논문에서는 근거리에서의 무선 전력 전송을 위해 부하단의 변화에도 출력단의 특성이 크게 변하지 않는 평형 증폭기(Balanced amplifier)구조를 이용하여, 9 ~ 11MHz 대역의 주파수 조정 범위를 갖는 10W급의 전력원을 설계 제작 하였다.

2. 본 론

2.1 무선 전력 전송 시스템의 전체 구성 및 개요

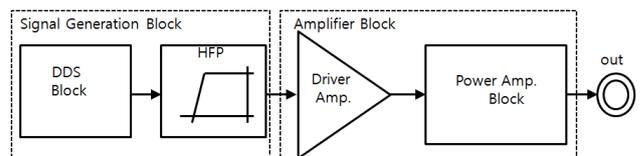


그림 1 제안한 전력원에 대한 블록 구조

Fig. 1 Block diagram of the proposed power source

전원선 없이 전력을 전달하기 위한 무선 전력 전송 기술은 19세기에 니콜라 테슬라(Nikola Tesla)에 의해 알려진 자기 유도 원리를 사용하게 됨으로 전력 전송에는 RF 전력 생성기가 필요하며, 전력 생성부의 기술은 RF 송신기의 구조와 유사하다. 본 논문에서 구성한 무선 전력 전송 시스템의 전체적인 구성은 다음의 그림 1과 같다. 설계 구조는 신호 생성부와 증폭부로 나눌 수 있다. 신호 생성부는 신호를 생성하기 위한 DDS(Direct Digital Synthesizer)부분과 저주파 잡음 제거를 위한 HPF(High-Pass Filter)부분으로 구성되어 전력전송에 사용할 9 ~ 11MHz의 깨끗한 신호를 생성하는 부분이다. 증폭부는 전력증폭기가 동작하기에 충

* 정 회 원 : 서울시립대 전자전기컴퓨터공학부 박사과정
** 정 회 원 : (주)엠가드 주임연구원
*** 준 회 원 : 서울시립대 전자전기컴퓨터공학부 석사과정
† 교신저자, 정회원 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

E-mail : mqlee@uos.ac.kr

접수일자 : 2011년 9월 27일

최종완료 : 2012년 2월 21일

분한 전력으로 신호를 증폭하는 구동 증폭기(Driver Amplifier)와 최종 10W의 전력을 출력할 수 있는 전력 증폭기(Power Amplifier)로 구성된다.

2.2 신호 생성부의 구조

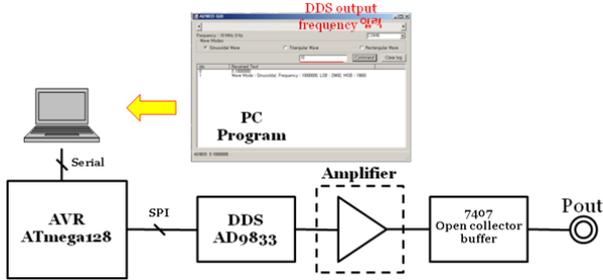


그림 2 DDS 블록 구조
Fig. 2 Block diagram of DDS

무선 전력 전송을 위한 CW(Continuous Wave) 신호의 생성은 일반적인 RF회로에서 사용하는 VCO(Voltage Controlled Oscillator)를 대신하여 주파수 가변을 PC 프로그램을 이용하여 쉽게 할 수 있는 DDS를 이용하였다. DDS는 디지털 적으로 주파수 합성기를 구현함으로써 정교한 분해능(resolution)과 우수한 위상잡음(phase noise)을 얻을 수 있다. 본 논문의 전력원에서 사용한 DDS는 Analog Device社의 DDS제품인 AD9833을 이용하였으며, 출력되는 신호의 크기를 증폭해 주기 위해서 BJT를 이용한 증폭기와 Open Collector 버퍼인 7407을 사용하였다. 회로의 동작은 사용자가 컴퓨터 프로그램을 이용하여 원하는 출력 주파수(9 ~ 11MHz)의 값을 입력하면, PC와 U-Art 통신으로 연결된 AVR(ATmega128)을 통해 입력되며, AVR에서 SPI(Serial Peripheral Interconnect)통신을 이용하여 DDS로 출력 주파수 정보를 전달한다. DDS에서 출력된 신호는 증폭기와 7407 Open collector 버퍼를 통해 구동 증폭기를 동작 시킬 수 있는 충분한 크기의 신호로 증폭이 되어 출력이 된다.

2.3 증폭부 설계

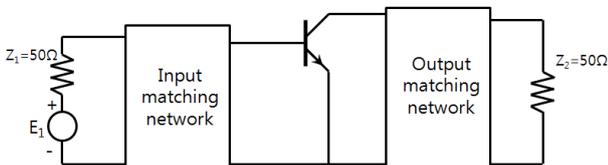


그림 3 1단 마이크로파 증폭기 다이어그램
Fig. 3 Block diagram of a single stage microwave amplifier

증폭부는 신호생성부에서 생성된 신호를 10W의 최종 출력으로 증폭하여 주는 부분으로 구동 증폭기와 전력증폭기 부분으로 구성되어 있다. 그림 3은 일반적인 마이크로파 증폭기의 다이어그램이다. 마이크로파 증폭기는 입력출력 정합에 따라 잡음(noise), 이득(gain), 전력(power) 등의 출력 특성이 변하는 특성을 가지고 있다.[2] 무선전력 전송에서는 부하단인 한 개가 아니라 여러 개가 될 수도 있고, 부하의

위치가 고정되어 있지 않고 수시로 변할 수 있는 특성을 가지고 있기 때문에 부하단의 값을 50Ω 고정으로 설계하면 실제 사용에서는 설계와 다른 출력특성을 보일 수도 있다. 따라서 본 논문에서 설계 제작한 전력증폭기의 구조는 부하단의 임피던스 변화에도 전력증폭기의 특성이 변화가 적은 구조를 사용한다.

2.3.1 평형 증폭기의 구조

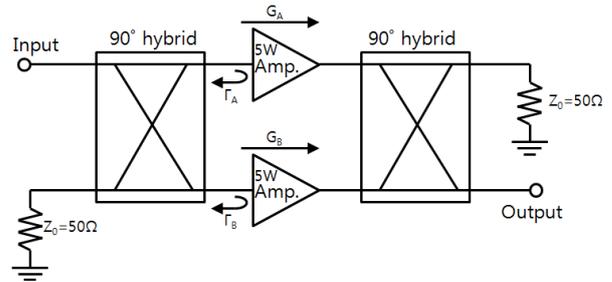


그림 4 90° 하이브리드 결합을 이용한 평형 증폭기
Fig. 4 A balanced amplifier using 90° hybrid couplers

평형 증폭기의 구조는 입력 단이나 출력단의 임피던스 변화에도 안정적으로 동작하는 대표적인 전력 증폭기의 구조이다. 입력 단이나 출력 단에서의 부정합 특성에 의해 생기는 반사가 90°하이브리드의 중단에서 흡수되어 두 개의 증폭기의 안정도와 입-출력 정합이 개선되는 특성을 가지고 있다.[4] 평형 전력 증폭기의 출력특성은 아래의 수식과 같다.

$$S_{11} = \frac{1}{2}(\Gamma_A - \Gamma_B) \tag{1}$$

$$S_{21} = -j\frac{1}{2}(G_A - G_B) \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)에서 증폭기의 전체 이득은 두 증폭기의 이득의 평균이 됨을 알 수 있고, 두 증폭기를 동일한 증폭기를 사용한다면 $\Gamma_A = \Gamma_B$ 이므로, $S_{11} = 0$ 이 되어 증폭기의 반사가 없게 된다. 또한 두 개의 증폭기를 사용하게 되어 회로의 안정성도 높아지게 된다. 만일 한 개의 전력 증폭기가 고장이 나게 되면 전체의 전력은 1/2로 줄어들게 되며, 이는 6dB의 손실이 생기게 되지만 회로는 동작이 되는 안정적인 구조이다. 평형 증폭기에서 10W의 출력을 얻기 위해 각각의 증폭기의 출력을 5W가 되게 하면 10W의 출력을 얻을 수 있으며, 그 출력 특성은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \frac{V_{CC}^2}{2R} \tag{3}$$

식 (3)을 이용하여 부하단의 임피던스 변환 없이 5W의 출력을 얻기 위한 전력증폭기의 V_{CC} 의 값을 계산하면 약 22V이므로, 실제 전력 증폭기의 제작에서는 24V를 사용하여 제작 하였다.

2.3.2 90° 하이브리드(hybrid) 제작

평형 증폭기는 두 개의 90°하이브리드가 필요한 구조이다. 대표적인 90°하이브리드의 구조는 브랜치 선로 하이브리드(Branch-line Hybrid)와 방향성 결합기(Directional Coupler)가 있다. 이러한 소자들은 RF 주파수 대역에서 전송선로(Transmission Line)를 이용하여 구현하는 것이 일반적이나, 10MHz와 같이 낮은 주파수에서는 비현실적인 전송선로의 길이가 필요하므로 실제 제작시 집중소자를 이용하여 구현하였다. 본 논문에서는 하이브리드 회로 중에서 그 구조가 단순하고 구현이 용이한 구조로 그림 5와 같이 2개의 커패시터와 1개의 결합 코일만으로 구현이 가능한 구조를 제작하였다.

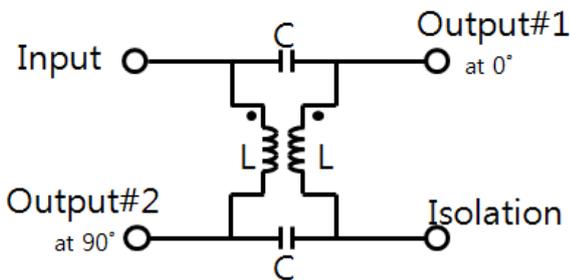


그림 5 집중소자를 이용한 90° 하이브리드 결합기
Fig. 5 90° hybrid coupler using lumped elements

상기 그림에서 트랜스포머의 인덕턴스 값과 커패시터의 값은 아래의 수식으로 구해진다.[5]

$$L = \frac{Z_0}{2\pi f \sqrt{2}} \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f Z_0 \sqrt{2}} \quad (5)$$

Z₀를 50Ω으로 하여 10MHz에서 계산하면 인덕터는 약 588nH, 커패시터는 약 210pF으로 계산된다. 실제 구현시 전력 증폭기 뒷단에 사용하게되는 90°하이브리드는 10W의 전력에도 견딜 수 있는 정격이 큰 소자를 이용하여 구현하였다.

2.4 제작 및 측정 결과

2.4.1 개별 블록의 제작 회로도

DDS부분의 AD9833의 경우 제조사의 회로를 이용하여 구성하였으며, SPI통신을 하기 위해 AVR모듈을 사용하였고, AVR을 PC와 연동하여 주파수를 조정할 수 있도록 프로그래밍을 하였다.

DDS의 출력은 DC제거를 위한 커패시터를 통과한 후 BJT에 의해 1차적인 증폭을 하고, 24V로 연결된 Open Collector 버퍼에 의해 구동 증폭기를 동작시키기에 충분한 크기로 증폭을 시켜준다.

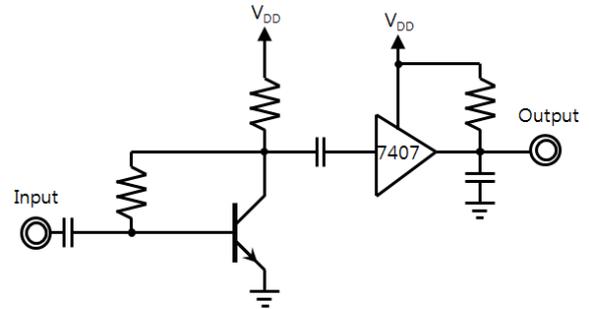


그림 6 BJT증폭기 및 Open Collector TTL을 이용한 버퍼 증폭기
Fig. 6 Buffer amplifier of DDS using a BJT and open collector TTL

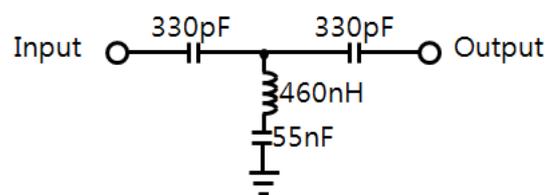


그림 7 신호 생성부에서 생성된 저주파 잡음을 제거하기 위한 HPF 회로
Fig. 7 High pass filter for eliminating low frequency noise generated in signal source

신호 생성부에서 신호와 함께 생성된 저주파 노이즈를 제거하기 위한 HPF는 그림 7과 같은 구조로 제작 하였다. 제작된 HPF의 저주파 차단 주파수는 측정결과 9MHz이며, 10MHz, 11MHz에서의 삽입손실은 각각 1.7dB, 1.06dB를 갖고, 1MHz에서의 저주파 잡음 제거 특성은 80dB이상 이다.

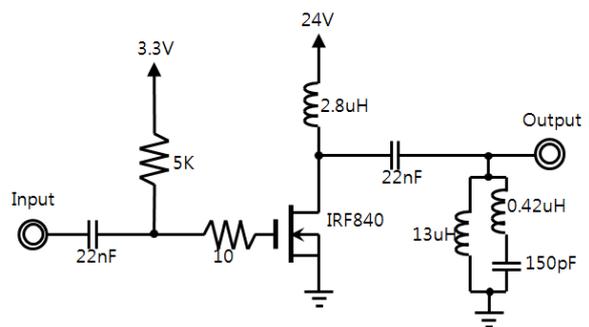


그림 8 구동 증폭기의 회로도
Fig. 8 Schematic of driver amplifier

구동 증폭기는 저가 범용 소자인 IRF840소자를 이용한 간단한 CS(Common Source)증폭기의 구조로 제작하였다. 출력단의 공진기는 증폭기에서 생성된 2차 하모닉을 제거하기 위해 사용한 공진기로 10MHz에서는 개방(open)으로 보이며, 20MHz에서는 단락(short)으로 보이게 설계 하였다.

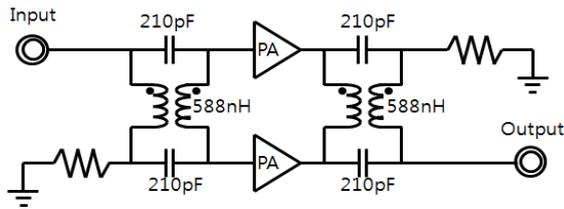


그림 9 제작한 전력 증폭기의 회로도
Fig. 9 Schematic of the manufactured power amplifier

전력증폭기는 3dB 90°하이브리드를 이용한 평형 증폭기의 구조를 이용하였으며, 각 전력증폭기의 회로도도 구동 증폭기의 회로와 동일한 회로를 이용하였다. 10W의 매우 큰 전력을 출력하고, 설계시 효율을 고려하지 않았기 때문에 많은 열이 발생하므로, 열의 발생을 줄여 정상적인 동작을 하기 위해, 쿨러를 이용하여 방열을 해주어야 정상적인 동작이 가능하다.

2.4.2 측정결과

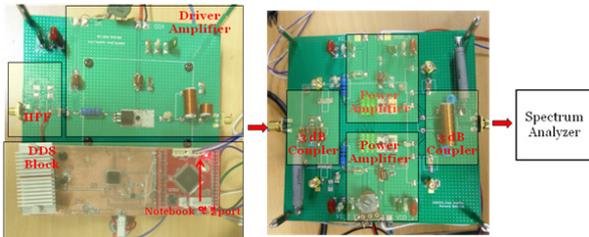


그림 10 제작된 전력 소스의 제작 사진
Fig. 10 Photograph of the manufactured power source

그림 10은 최종 제작된 모듈의 사진과 측정을 위한 연결도이다. 신호생성부와 구동 증폭기를 포함한 하나의 모듈과 전력 증폭기를 구현한 모듈을 각각 제작하여 2개의 모듈로 제작하였다. 각 모듈의 크기는 150mm * 150mm로 동일하여 실제 사용 시 두 개의 모듈을 위아래로 쌓아서 사용할 수 있도록 설계 하였다. 최종 출력 결과의 특성은 아래의 표와 같이 9 ~ 11MHz 대역에서 10W 이상의 전력이 출력되는 것으로 측정되었다.

표 1 제작된 회로의 주파수별 측정 결과
Table 1 Measurement results of the manufactured power source

Parameter	9 MHz	9.5 MHz	10 MHz	10.5 MHz	11 MHz
DDS Current [mA]	150	150	150	150	150
DA Current [mA]	245	255	266	272	279
PA Current [mA]	824	843	835	823	810
FAN Current [mA]	201	201	201	201	201
Output Power [dBm]	40.3	40.5	40.4	40.3	40.2

3. 결 론

본 논문에서는 근거리 무선 전력 전송을 위한 전력원을

실제 제작하였다. 설계된 RF 무선 전력 전송 전력원은 RF 송신기의 반송파만을 이용할 때의 구조를 이용하였으며, 실제 사용시 부하단의 값이 변하여도 전력원의 특성이 변하지 않도록 평형 증폭기의 구조를 이용하였다. 설계된 전력원은 주파수 조정범위 9 ~ 11MHz 내에서 40dBm이상 즉, 10W이상의 전력이 출력됨을 확인 하였다. 제작된 회로는 설계시 전력증폭기의 효율을 고려하지 않은 설계로 인해 열이 많이 발생하는 문제가 있으므로, 이를 쿨러를 이용하여 해결하였다. 추후 제작시에는 전력 효율을 높이고, 열의 발생을 낮추기 위해서 증폭기의 Class를 높이는 방법으로 설계를 진행하여 문제를 해결할 수 있을 것으로 보인다. 제작된 RF Power Source는 실제 무선전력전송에 사용할 때 부하단의 임피던스 변화에 영향이 적은 구조이므로 앞으로 무선전력 전송의 많은 부분에서 응용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학연공동기술개발사업 (No. 00047744-1)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다

참 고 문 헌

- [1] 조덕창, “무선전력 전송기술”, 정보통신연구진흥원 학술 정보 전과지, 제 2002권 104호.
- [2] 강승열, 김용해, 이명래, 정태형, “무선 에너지 전송 기술”, ETRI 전자통신동향분석, 제 23권 6호, 2008년 12월.
- [3] Guillermo Gonzalez, “Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design”, Prentice Hall, Second Edition, 1996.
- [4] David M. Pozar, “Microwave Engineering”, John Wiley&Sons,Inc. Third Edition, 2006.
- [5] Peter Vizmuller, “RF Design Guide System, Circuit, and Equations”, Artech House, 1995.

저 자 소 개



박 동 훈 (朴 東 勳)

2006년 2월: 경원대학교 전자공학과 공학사
 2007년 12월: 인티그런트테크놀로지스 (주) 연구원, 2010년 8월: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 공학석사, 2010년 9월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 박사과정
 <관심분야>
 - 마이크로파 회로 및 부품 설계
 - 마이크로파시스템, RFID 시스템



김 귀 성 (金 貴 誠)

2009년 2월 : 안양대학교 정보통신공학과
공학사, 2011년 2월 : 서울시립대학교 전
자전기컴퓨터공학부 공학 석사, 2011년 2
월~현재:(주)엠가드 주임연구원

<관심분야>

- RF/Microwave 회로설계



임 은 천 (林 銀 天)

2007년 2월: 순천대학교 컴퓨터과학과 학사
2009년 2월: 순천대학교 대학원 정보통신
공학부 멀티미디어공학과 공학석사
2008년 4월~2009년 10월: 은천출판 운영
2010년 9월~현재: 서울시립대학교 전자
전기컴퓨터공학부 석사과정

<관심분야>

- 마이크로파시스템
- 소프트웨어 엔지니어링



박 혜 미 (朴 惠 美)

2012년 2월 : 서울시립대학교 전자전기컴
퓨터공학부 공학석사, 2012년 1월~현재 :
한국수자원공사 연구원

<관심분야>

- RFID 회로설계
- RF/Microwave 회로 및 시스템



이 문 규 (李 文 揆)

1992년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전
자공학과 공학사, 1994년 2월 : 서울대학
교 대학원 전자공학과 공학석사, 1999년
2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 공
학박사, 2002년 2월 : 한국전자통신연구
원 통신위성개발센터 선임연구원, 2002년

3월~현재 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수

<관심분야>

- RFIC
- MMDS용 초저가 발진기 개발
- UHF대역 RFID 및 안테나 모듈