

다중대역 RRH를 위한 Class-J 전력증폭기의 광대역과 고효율 특성분석

An Analysis of Wideband and High Efficiency Class-J Power Amplifier for Multiband RRH

최 상 일 · 이 상 록* · 이 영 철

Sang-Il Choi · Sang-Rok Lee* · Young-Chul Rhee

요 약

지금까지 LDMOS를 사용한 전력증폭기는 AB-급 및 도허티 방식으로 60 MHz 대역폭의 협대역에서 55 %의 효율을 보여주고 있으나, 기지국의 전력증폭 모듈의 RRH의 적용에 따라 100 MHz 이상의 대역폭 확장과 60 % 이상의 고효율 전력증폭기를 요구하고 있으므로, 본 연구에서는 GaN 소자를 이용하여 2차 고조파 부하가 순수한 리액턴스 성분만을 포함하고, 광대역 특성을 갖도록 출력단 정합회로를 최적화하여 J-급 전력증폭기를 설계하였다. 측정 결과, W-CDMA 주파수 대역을 포함한 1.6~2.3 GHz에서 연속파 신호를 입력하였을 때 60~75 %의 전력 부가 효율 특성을 갖는 45 W급 J-급 전력증폭기를 구현하였다.

Abstract

Until recently, power amplifiers using LDMOS were Class-AB and Doherty type, and showed 55 % efficiency for narrowband of 60 MHz bandwidth. However, owing to the RRH application of base stations power amplifier module, a bandwidth expansion of at least 100 MHz and high efficiency power amplifiers of at least 60 % power efficiency are required. In this study, a Class-J power amplifier was designed by optimizing an output matching circuit so that the second harmonic load will contain a pure reactance element only and have broadband characteristics by using GaN HEMT. The measurements showed that a 45 W Class-J power amplifier with a power added efficiency of 60~75 % was achieved when continuous wave signals were input at 1.6~2.3 GHz, including W-CDMA application.

Key words: Class-J Power Amplifier, GaN, Load-Pull, Wideband

I. 서 론

근래의 이동통신 시스템은 근본적으로 멀티미디어 서비스의 확산과 고속통신 기능의 요구를 충족시키기 위해 발전하고 있으며, LTE(Long Term Evolution) 서비스의 시

작으로 속도와 용량의 증가가 더욱 가속화 되고 있다^[1]. 멀티미디어 서비스의 확산을 통한 다양한 서비스의 공급은 휴대전화에 의한 데이터 통신 트래픽 증가의 원인이 된다. 기존의 3G/4G의 서비스로는 주파수 자원의 고갈, LDMOS를 이용한 전력증폭기의 협대역성, 무선단말기

경남대학교 정보통신공학과(Department of Information & Communication Engineering, Kyung-nam University)

*(주)한국통신부품(Korea Telecommunication Component) 부설연구소

· Manuscript received January 6, 2015 ; Revised February 5, 2015 ; Accepted February 13, 2015. (ID No. 20150106-08S)

· Corresponding Author: Sang-Il Choi (e-mail: sichoi@integral-lab.com)

효율개선 등의 한계 등의 문제로 5G에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾. 데이터 속도의 증가와 용량의 증가는 기지국에서의 전력소비를 증가시키며, 전력증폭기는 기지국 소모 전력의 대부분을 차지하기 때문에 전력증폭기의 소모 전력을 낮출 필요성이 있다. 그리고 LTE 대역의 확장과 기존의 3G 시스템에서 효과적으로 사용될 수 있도록 전력증폭단은 범용성을 가져야 한다³⁾.

이러한 요구사항을 충족시키기 위해 다중모드 RRH 기법이 개발되었으며, 이는 W-CDMA(Wideband Code Division Multiple Access), 3G 서비스, 그리고 LTE 서비스를 지원하도록 개발되었다. 이러한 다중모드 RRH는 기저대역과 RF 모듈이 분리되어 광케이블로 연결이 되며, RF 모듈을 안테나에 가깝게 위치시키므로 케이블에 의한 손실을 최소화 시킨다. 그림 1은 다중모드 RRH의 구성도를 보여주며, CPRI(Common Public Radio Interface)는 W-CDMA용 1.2288 Gbps의 전송속도와 LTE용 2.4576 Gbps의 전송속도로 지원하기 때문에 다중모드로 적용이 가능하다¹⁾. 한편 RRH에 적용하고 있는 전력증폭소자의 경우 LDMOS에서 GaN 전력소자로 대체되는 추세에 있으며 GaN HEMT는 넓은 에너지 갭을 갖는 반도체로 고온에서 안정적이며 큰 항복전압을 나타내고, 높은 포화전자 속도를 바탕으로 고효율, 고효율, 우수한 대역 특성을 가지고 있어 광대역 응용에 적합한 소자이므로, 중계시스템의 광대역화를 위해 GaN 소자를 적용한 전력증폭기설계에 관한 연구가 소개되고 있다⁴⁾.

전력증폭기는 선형성뿐만 아니라, 고효율 특성과 광대

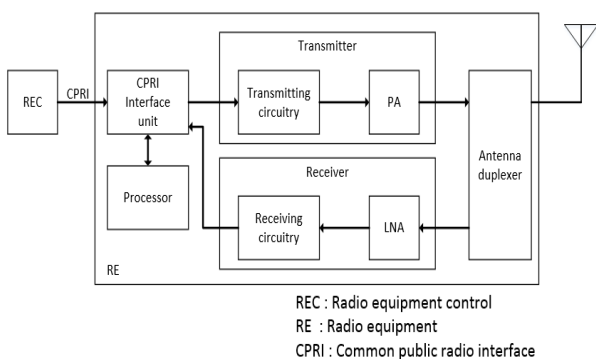


그림 1. RRH 구성도
Fig. 1. Block diagram of RRH.

역 특성이 강조되고 있다. 중계시스템의 효율을 개선시키기 위해 DPD(Digital Pre-Distortion) 방식과 도허티 구성과 같은 방법이 있으나, 근래에는 D급, E급, F급과 같은 스위치 모드 전력증폭기가 연구되고 있다^{4)~6)}. 스위치 모드 전력증폭기는 전력 소자를 스위치로 동작하도록 하여 이론적으로는 최대 드레인 효율이 100 %를 얻을 수 있다. 그러나 스위칭 시간의 제한, 전력소자가 갖는 기생성분에 의한 전력소자의 비선형 조건들에 의해 100 %의 효율을 얻을 수 없으며, 실제 구현하기에 회로가 복잡한 문제가 있다⁷⁾.

이상적인 스위칭 모드 전력증폭기의 동작에서 고조파 조정 조건을 만족하는 것은 쉽지가 않으며, 전력소자의 출력단 커패시턴스가 존재하기 때문에 보다 높은 고조파는 조정하기 어려우므로, 이런 문제점으로 인해 출력단 정합회로에서 2차 고조파만을 조정한 J-급 전력증폭기가 필요하다. J-급증폭기는 스위칭 모드 전력증폭기와 같이 높은 효율뿐만 아니라, AB급, B급과 같은 높은 선형성과 광대역 특성을 나타낸다⁸⁾.

본 논문에서는 LTE 이동통신 주파수 대역인 1.8 GHz, 2.1 GHz, WCDMA 주파수 대역에 적용 가능한 중계기용 전력증폭기를 설계하기 위하여, 광대역 특성이 우수한 GaN HEMT를 이용하여 전력증폭기의 선형화 과정에서 문제시 되고 있는 광대역 특성과 선형성을 유지하면서 효율을 높이기 위해 소스-풀(source pull)/로드-풀(load pull)에 의한 설계과정을 통해 최적화 된 입/출력 정합회로를 설계하고 J-급 전력증폭기의 출력단은 2차 고조파 부하가 순수한 리액턴스 성분만을 나타내고, 양호도 Q값이 작게 나타나도록 최적화 시켜 설계한 J-급 증폭기가 차세대 RRH에 적용가능함을 나타내고자 한다.

II. J-급 전력증폭기 동작 특성 분석

J-급 전력증폭기는 스위치 모드 전력증폭기와는 다르게 전압과 전류의 중첩을 허용하면서 기본 주파수 전력의 증가를 위해 2차 고조파가 리액턴스 성분만을 가지도록 하여 효율을 개선하는 개념이다. J-급 전력증폭기의 드레인 전류 파형이 DC 성분, 기본 주파수 성분, 2차 고조파 성분만 갖는다면 드레인 전류는 식 (1)과 같다⁷⁾.

$$\begin{aligned} Drain_{current} &= I_{DC} + I_{fund} + I_{second} \\ &= I_{DC} \times \left(1 + \frac{\pi}{2} \sin(\theta) - \frac{2}{3} \cos(2\theta) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

전력증폭기의 드레인 전압파형은 드레인 전류파형에 의해 180° 위상차를 가지게 된다. DC 전력을 기본 주파수 전력으로 최대한 변환하기 위해서는 고조파에서의 전력 소비를 최소화 하여야 하므로, 2차 고조파 부하는 순수한 리액티브 성분만 가지도록 해야 한다. 2차 고조파 부하는 인덕티브 또는 컨덕티브가 될 수 있다. 2차 고조파의 부하가 인덕티브 성분이면 2차 고조파 전압이 전류보다 90° 앞서고, 컨덕티브 성분이면 90° 늦게 된다.

기본 주파수의 드레인 전압 파형과 2차 고조파 파형의 최고치가 동기화 되도록 하기 위해 드레인 전압이 드레인 전류보다 45° 앞서거나 늦어지도록 하여야 한다.

드레인 전압은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$Drain_{voltage} = V_{DC} \times (1 + x \times \sin(\theta) + y \times (2\theta)) \quad (2)$$

x, y 는 기본 주파수 전압과 2차 고조파 전압의 크기를 나타낸다. 기본 주파수 파형과 2차 고조파 전압이 동기가 되면 2개의 최고치와 2개의 최저치가 나타난다.

$$Peak_{1,2} = 1 \pm x + y \quad @ \theta_1 = \frac{\pi}{2}, \theta_2 = \frac{3\pi}{2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Min_{1,2} &= 1 - y - \frac{x^2}{8y} @ \theta_1 = \pi + \sin^{-1}\left(\frac{x}{4y}\right) \\ & @ \theta_2 = 2\pi - \sin^{-1}\left(\frac{x}{4y}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$Min_{1,2}$ 가 0으로 가정하면 식 (4)는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$y = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{x^2}{2}} \quad (5)$$

이때, y 가 최소값을 가질 때, x 가 최대값이 되므로 x, y 는 식 (6)과 같다.

$$x_{max} = \sqrt{2}, y_{min} = \frac{1}{2} \quad (6)$$

J-급 전력증폭기의 이론적인 드레인 효율은 78.5%이고, B-급 전력증폭기의 효율과 같게 된다^[8]. J-급 전력증폭기가 최대 효율을 얻기 위해서는 식 (6)과 같은 값이 되도록 x, y 를 선택해야 한다. 2차 고조파 부하가 커패시턴스 성분이면 2차 고조파 드레인 전압이 드레인 전류보다 위상이 90° 앞서야 하므로 2차 고조파 드레인 전압은 식 (7)과 같다.

$$V_{second} = -y \cos\left(2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)\right) \quad (7)$$

기본 주파수와 2차 고조파 전압 파형의 최고치 동기를 맞추기 위해서는 기본 주파수 드레인 전압 파형은 드레인 전류 파형의 위상보다 45° 뒤쳐져야 하므로 기본 주파수 드레인 전압은 식 (8)과 같게 된다.

$$V_{fund} = x \sin\left(\theta + \pi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (8)$$

그림 2와 같이 2차 고조파 부하가 인덕티브 성분 혹은 커패시턴스 성분을 가지는 것에 따라 드레인 전압이 45° 앞서거나 뒤질 것이다. J-급 전력증폭기가 최대 효율을 가지기 위해서는 기본 주파수 전압 파형의 최대치와 2차 고조파 전압 파형의 최대치가 동기가 되도록 드레인 전압과 드레인 전류간의 위상차가 $\pi/4$ 가 되어야 하며, 기본 주파수 전압은 $\sqrt{2}$, 2차 고조파 전압은 1/2가 되어야 한다. J-급 전력증폭기는 중심 주파수에서 벗어날 때, 드레인 효율, 전력 부가 효율, 출력 전력과 출력 전력 이

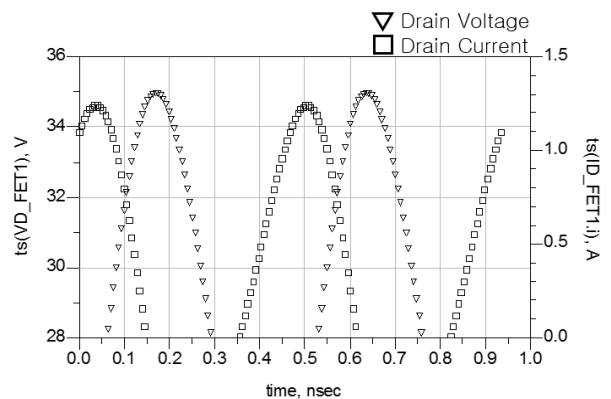


그림 2. 드레인 전압 파형과 드레인 전류 파형
Fig. 2. Drain voltage waveform and drain current waveform.

특이 급격히 떨어진다. 그 이유는 전력 소자가 가지고 있는 기생 성분(C_{DC})이 주파수에 따라서 변하기 때문이다.

전류 그래프가 음수인 이유는 시뮬레이션에 사용된 트랜지스터 모델은 기생 성분과 패키징 효과를 포함한 패키지 모델을 사용하였기 때문이며 트랜지스터가 꺼지는 순간 기생 커패시턴스에 충전된 전자들이 트랜지스터로 흐르면서 발생된 전류가 포함되어 나타나기 때문에, 시뮬레이션 결과에서는 음수의 전류파형이 나타난다.

광대역 특성을 가지기 위해서는 출력 기생 커패시턴스가 주파수에 따라 보상이 되어야 하나 실질적으로 주파수에 따른 보상이 매우 어렵다. 그러나 GaN HEMT의 경우 다른 전력증폭소자와 비교했을 때, 2.3~2.6 pF의 낮은 커패시턴스 값을 가지기 때문에 광대역 전력증폭기 설계에 유리하다. 정합회로의 설계에 있어서 주파수 영역에 걸쳐서 출력 커패시턴스에 대한 완벽한 보상을 할 수 없으므로, 설계하고자 하는 주파수 대역의 낮은 주파수를 기준으로 정합을 수행된다. 이때 출력 정합회로는 충분한 전기적 길이를 확보하여 설계 주파수 대역에서 전력증폭기의 출력 반사손실 특성이 2~3 pole을 갖도록 하여, 광대역 특성을 유도하고, 입력 정합회로는 전체 대역의 이득 평탄도 특성을 확보할 수 있도록 정합회로를 설계하는 것이 중요하다.

III. 고효율, 광대역을 위한 임피던스 정합과 J-급 전력증폭기 설계 및 제작

본 논문에서 사용한 GaN 45 W급의 출력 특성을 갖는 소자를 사용하였으며, GaN 소자의 최적의 임피던스에 따른 정합회로를 설계하기 위하여 소스-풀과 로드-풀을 수행하였다. 그림 3은 로드-풀 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 드레인 28 V와 AB-급으로 동작할 수 있도록 -3.05 V의 게이트 전압을 인가하여 시뮬레이션에 적용하였다. 1.6~2.3 GHz에서 GaN 소자가 가지는 최적의 입력 임피던스와 출력 임피던스를 추출하였으며, 60 % 이상의 전력 부가 효율과 47 dBm 이상의 최대 출력 전력을 가지는 입/출력 임피던스로 정합회로를 구현하고, 로드-풀을 이용하여 각각의 주파수에서 출력 전력과 부가효율을 확인하

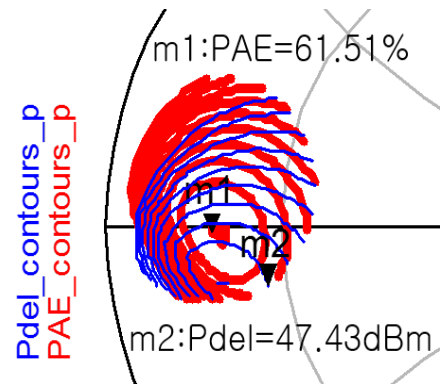


그림 3. 로드-풀 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Load-pull simulation result.

였다.

J-급 전력증폭기 설계에서 출력단에는 높은 효율과 출력 전력을 갖기 위한 기본 주파수 출력 정합회로와 2차 고조파의 위상과 크기를 제어하기 위한 2차 고조파 제어부를 적용하였다. 출력 정합회로에 개방스텝(open stub)을 적용하여 2차 고조파 부하가 순수한 리액턴스 성분만을 가지도록 하여 광대역 특성을 얻도록 하였다.

2차 고조파 부하의 리액턴스 성분이 커패시티브를 가지므로 드레인 전압은 드레인 전류보다 45° 뒤처짐을 알 수 있다. 하지만, 사용 주파수 대역에서 모든 2차 고조파 성분이 이러한 관계를 가지고 있지 않으며, 특정 주파수에서는 2차 고조파가 순수한 리액턴스 성분을 가지지 못함으로써, J-급 동작이 무너지는 현상이 나타난다. 시뮬레이션 결과, 1.6~2.3 GHz 주파수 대역에서 P_{1dB} 기준으로 45~46 dBm을 가지고, 전력 부가 효율은 63~70 %의 높은 효율을 얻을 수 있었다. 그림 4와 그림 5는 각각 주파수별 출력 전력과 이득특성과 전력 부가 효율 특성을 나타낸다.

그림 6은 출력 정합회로에 개방스텝을 이용한 2차 고조파 제어부를 적용하여 제작된 J-급 전력증폭기를 나타내며, 유전율 3.5의 PCB를 사용하였다. 그림 7, 8은 제작된 전력증폭기의 측정 결과를 나타내고 있다. 측정 결과, 1.6~2.3 GHz 주파수 대역에서 출력 전력 46 dBm(45 W) 이상의 출력과 60~75 %의 전력 부가 효율 특성을 확인하였다.

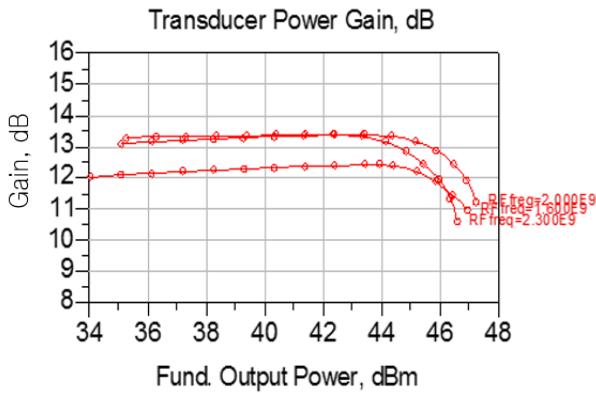


그림 4. 주파수별 출력 전력
Fig. 4. Frequency-dependent output power.

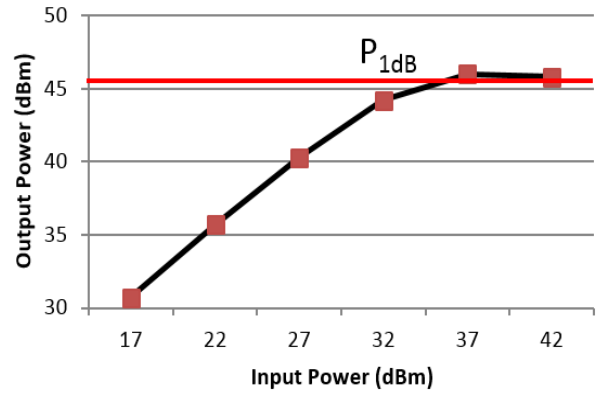


그림 7. P_{in}/P_{out} 관계 그래프
Fig. 7. P_{in} VS P_{out} test result.

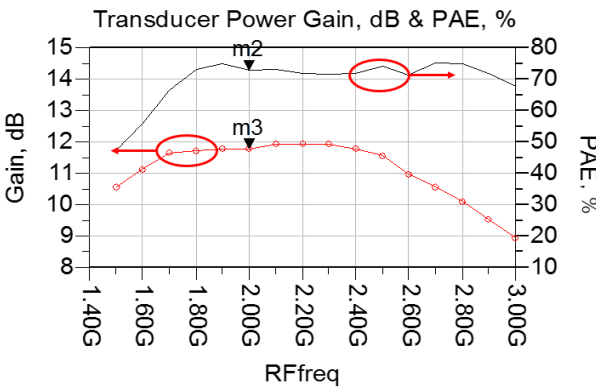


그림 5. 주파수별 이득 특성과 전력 부가 효율
Fig. 5. Frequency-dependent gain and power added efficiency.

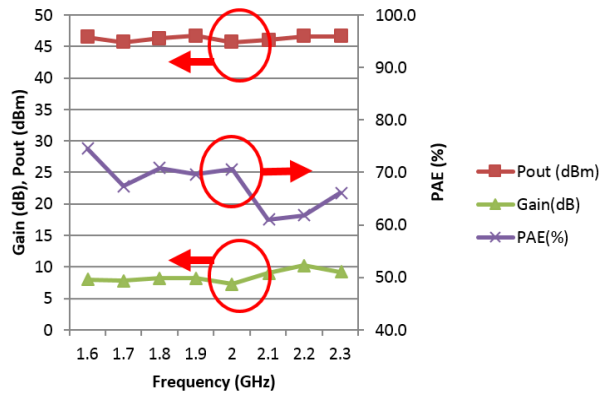


그림 8. 주파수별 출력 전력, 이득, 전력 부가 효율 측정 결과
Fig. 8. Frequency-dependent P_{out} , gain, power added efficiency.

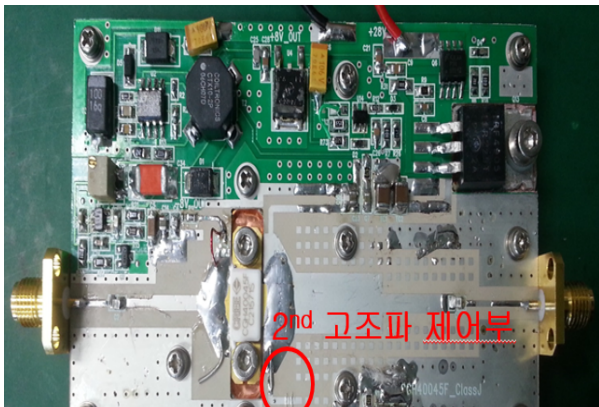


그림 6. 제작된 J-급 전력증폭기
Fig. 6. Class-J power amplifier of implementation.

시뮬레이션 결과와 비교한 결과, 출력 전력은 동일한 45 W 이상의 출력 전력을 확인할 수 있었다. 전력 부가 효율의 경우, 시뮬레이션 결과에서 1.6 GHz에서 낮은 전력 부가 효율 특성을 나타내었으며, 이를 보완하고자 2차 하모닉을 제어회로의 추가적인 조정을 통하여 1.6 GHz에서 시뮬레이션 결과값보다 우수한 75 %의 효율을 확인하였다.

본 논문에서 제작한 J-급 전력증폭기의 성능과 참고문헌의 성능비교를 표 1에 정리하였다. 참고문헌은 각각 D, E, F-급으로 설계된 전력증폭기이며, 참고문헌 [5]의 경우 79 %의 효율을 보였으나, 단일 주파수에서 측정된 결과를 나타내었다. 주목할 점은 동일한 GaN HEMT를 사용하면

표 1. 전력증폭기 성능 분석

Table 1. Power amplifier performance analysis.

	f_c [MHz]	BW [MHz]	P_{out} [W]	PAE [%]	HEMT type
Ref. [4]	800	60	5.2	59	GaN
Ref. [5]	1,950	-	0.1	79	E-pHEMT
Ref. [6]	3,500	-	47	56.6	GaN
This work	1,950	700	45	60~75	GaN

서 본 논문에서 설계한 J-급 전력증폭기가 700 MHz의 대역폭을 가지면서 효율 특성이 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한, 스위치 모드 전력증폭기의 구현에 있어 전력소자의 기생성분에 의한 이론적 효율을 달성하지 못하는 것을 확인할 수 있으며, 스위치 모드 전력증폭기보다 단순한 구조를 가지므로 소형화에도 이점이 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 45 W급 GaN 소자를 이용하여 광대역 특성을 갖는 J-급 전력증폭기를 설계하였다. 본 논문에서 제안한 J-급 전력증폭기는 E, F-급과 같은 스위치 모드 전력증폭기와 비교하였을 때, 간단한 회로 구성으로도 고효율과 광대역 특성을 확보할 수 있다. 제작된 J-급 전력증폭기의 측정 결과, 1.6~2.3 GHz 대역에서 45 W급 이상의 출력 전력과 60 % 이상의 전력 부가 효율 특성을 나타내었으며, AB급의 게이트 바이어스를 사용함으로써 선형성 확보를 통한 LTE 및 WCDMA 주파수 대역에 적용 가능한 중계기용 전력증폭기로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 향후, 고정된 전송선로에 의한 정합회로와 2차 고조파 단락회로의 고정값에 의해 주파수에 따른 2차 고조파의 위상과 크기 제어에 대해 지속적인 검토가 필요하다. J-급 전력 증폭기를 이용하여 보다 높은 효율의 도허티 전력 증폭기의 연구를 통해 이동통신 시스템의 효율

개선에 대한 연구를 통해 RRH, 5G 시스템에 적용 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. Kumagai, Y. Funyu, and H. Maeda, "High-efficiency power amplifier for LTE/W-CDMA system", *FUSITSU Sci. Tech. Journal*, vol. 48, no. 1, pp. 33-39, Jan. 2012.
- [2] L. Xichun, R. Salleh, A. Aani, and O. Zakaria, "Multi-network data path for 5G mobile multimedia", *ICCSN '09*, pp. 583-587, Feb. 2009.
- [3] Y. Shimazu et al., "RRE shared between W-CDMA and LTE systems", *NTT DOCOMO Tech. Journal*, vol. 12, no. 1 pp. 29-33, 2010.
- [4] A. Wentzel, W. Heinrich, "A GaN voltage-mode class-D MMIC with improved overall efficiency for future RRH applications", *2013 EuMC*, pp. 549-552, Oct. 2013.
- [5] H. R. Bae, S. S. Cho, and J. W. Lee, "Efficiency enhanced class-E power amplifier using the second harmonic injection at the feedback loop", *2010 European Microwave Conf.*, pp. 1042-1045, Sep. 2010.
- [6] J. H. Kim, S. J. Lee, B. H. Park, S. H. Jang, J. H. Jung, and C. S. Park, "Analysis of high-efficiency power amplifier using second harmonic manipulation : Inverse class-F/J amplifiers", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, pp. 2024-2036, Aug. 2011.
- [7] N. Tuffy, A. Zhu, and T. J. Brazil, "Class-J RF power amplifier with wideband harmonic suppression", *2011 IEEE-S Int. Microwave Symp. Digest*, Jun. 2011.
- [8] P. Wright, J. Lees, J. Benedikt, P. J. Tasker, and S. C.ripps, "A methodology for realizing high efficiency class-J in a linear and broadband PA", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, pp. 31.

최 상 일



2013년 2월: 경남대학교 첨단공학과 (공학석사)
2013년 3월~현재: 경남대학교 첨단공학과 박사과정
2007년~현재: (주)인티그럴
[주 관심분야] 마이크로파 능동회로 응용, RF Power Amplifier 등

이 영 철



1981년~현재: 경남대학교 정보통신공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파 능동회로 응용, 레이더 시스템, RF Power Amplifier 등

이 상 룩



2011년 2월: 금오공과대학교 전자 및 전기공학과(공학석사)
2013년 3월~현재: 경남대학교 첨단공학과 박사과정
2011년~현재: (주)한국통신부품
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 레이더 시스템, SSPA 등