

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2019.19.1.231>

IIBC 2019-1-31

공간결합기를 이용한 Ka대역 20W급 SSPA 개발

Development of the Ka-band 20watt SSPA (Solid State Power Amplifier) Using a Spatial Combiner

최영락*, 이종우*, 이수현*, 안세환**, 이만희**, 김홍락**

Young-Rak Choi*, Jong-Woo Lee*, Su-Hyun Lee*, Se-Hwan An**,
Man-Hee Lee**, Hong-Rak Kim**

요 약 본 논문에서는 단위 전력증폭기를 여러 개 결합하여 높은 출력을 얻을 때 결합 손실을 최소화하여 증폭기의 효율을 높이는 방법에 대해 연구하였다. 구체적으로는 도파관과 cavity 구조로 되어있는 공간결합기를 이용한 Ka 대역 공간결합증폭기를 제안하였다. 제작된 공간결합증폭기는 Ka 대역 20W급의 SSPA로서 GaN bare die를 이용하여 설계된 5W급의 단위 증폭모듈 8EA를 적용하였다. 그리고 Hybrid Radial 구조의 8-way 공간분배기와 공간결합기를 이용하여 단위증폭모듈을 결합하였다. 제작된 공간결합기의 출력 결합손실은 약 0.334dB이며 약 92.6%의 효율을 얻었다. 본 논문의 공간결합증폭기는 최대포화출력 10W, 전력부가효율 15%이상을 목표로 개발하였으며, 측정결과 최대포화출력 30W와 전력부가효율19%의 결과값을 얻었다.

Abstract In this paper, we have studied how to improve the amplifiers efficiency by minimizing the combining loss when several unit power amplifiers are combined to obtain high output power. Specifically, we have developed Ka-band Spatial Combining Amplifier. The fabricated Spatial Combining Amplifier is a Ka-band 20W class SSPA, which uses a 5W class unit amplifier module 8EA designed using a GaN bare die. We also combined The unit amplifier module using 8-way spatial divider and combiner with a hybrid radial structure. The output combining loss of the fabricated spatial coupler is about 0.334dB, which is about 92.6% efficiency. In this paper, we developed a Spatial Combining Amplifier with a maximum saturation output of 10W and a power addition efficiency of over 15%. As a result, we achieved the maximum saturation output of 30W and the power addition efficiency of 19%.

Key Words : Ka-band, GaN, Spatial Combiner, Radial Combiner, SSPA

I. 서 론

전력증폭기는 모든 RF송수신시스템의 주요 구성요소로 출력신호의 최종단계의 효율적인 신호증폭의 역할을 갖는다. 전력증폭기의 가장 중요한 요소는 높은 선형성과 높은 전력효율을 가지는 것이며, 이를 위한 여러 구현

방안이 개발되어있는 상태이다. 현재까지 전력증폭용 소자 중 이를 만족하는 것은 GaN Transistor로써, 본 논문에서 전력증폭기용 소자로 사용하였다. 또한 높은 출력을 확보하기 위하여 결합손실이 적은 공간결합기를 이용한 밀리미터파 대역의 공간결합기를 설계·제작하였으며, 이

*정희원, (주)제트에이치티 기술연구소

**정희원, LIG 넥스원 감시정찰연구소. 12팀

접수일자 2018년 12월 27일, 수정완료 2019년 1월 27일

게재확정일자 2019년 2월 8일

Received: 27 December, 2018 / Revised: 27 January, 2019 /

Accepted: 8 February, 2019

*Corresponding Author: suhyun.lee@zht.co.kr
R&D Team, ZHT, Korea

를 통한 소형 레이더시스템용 펄스전력증폭기를 개발하였다.

II. 각 구성품설계

1. 공간결합기

가. 공간결합기의 개요

공간결합기는 도파관 및 Cavity 구조를 이용하여 신호를 분배 및 결합하는 RF Passive Component 이다. 3차원적인 구조 형태를 가지고 있으며 분배 또는 결합 시 대상물의 수의 증가에 따른 결합 효율의 감소가 없기에 보통 N-way 이상의 결합구조로 많이 사용된다.

본 논문에 적용된 공간결합기의 세부 사양은 표 1과 같다.

표 1. 공간결합기 세부 사양

Table 1. Radial Combiner specifications

항 목	세부 사양	비 고
결합기 형태	Radial Combiner	
주파수	29 ~ 31GHz	
결합 개수	8개	
출력 삽입손실	0.7dB 이하	
입력 반사손실	10dB 이하	
출력 반사손실	10dB 이하	

설계 주파수에 대한 대역폭이 7% 미만이기 때문에 협대역 특성을 가지지만 매우 우수한 결합 효율을 갖는 radial 구조의 결합기를 적용하였으며 출력 삽입손실 0.7dB 이하, 입출력 반사손실 10dB 이하를 목표로 설계를 진행하였다.

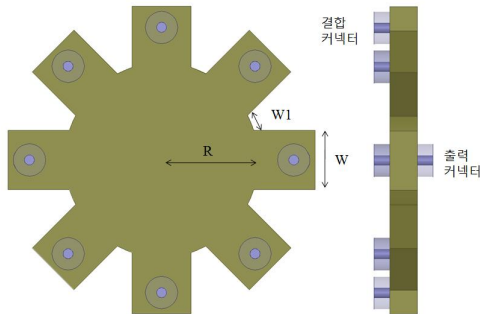


그림 1. Radial Combiner 구조
Fig. 1. Radial Combiner structure

그림 1은 Radial Combiner의 구조를 간략화한 형태이다. 출력 커넥터부터 내부 Cavity사이의 거리를 R로 명시하였고 도파관의 폭을 W, 도파관 사이의 최단거리를 W1으로 명시하였다. 결합 커넥터들이 출력 커넥터를 중심으로 균등한 길이와 각도로 배열되어 있으며 50ohm Term에 Termination 되어 있을 경우 다음과 같이 admittance matrix로 수식을 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{1,1} V_1 + (Y_{1,2} + Y_{1,3} + \dots + Y_{1,N+1}) V_2 \\ I_2 &= Y_{2,1} V_1 + (Y_{2,2} + Y_{2,3} + \dots + Y_{2,N+1}) V_2 \end{aligned} \quad (1)$$

V1은 출력 커넥터에 입사되는 전압을 나타내고 V2는 결합 커넥터에 입사되는 전압을 나타낸다. 수식 (1)과 (2)는 출력, 결합 커넥터에 흐르는 전류를 나타낸다.

위의 수식(1)은 수식(2) 및 수식(3)으로 간략화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{1,1} V_1 + N Y_{1,2} V_2 \\ I_2 &= Y_{2,1} V_1 + Y'_{2,2} V_2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$Y'_{2,2} = Y_{2,2} + Y_{2,3} + \dots + Y_{2,N+1} \quad (3)$$

출력 커넥터에 V1전압이 입사될 때 모든 결합 커넥터들은 단락되고 또한 모든 결합 커넥터들이 V2전압으로 입사될 때 출력 커넥터가 단락됨을 위의 수식으로 확인할 수 있다.

$$\frac{R}{2\sin(180^\circ/N)} + (W1 \cdot \cot(180^\circ/N)/2) \quad (4)$$

결합기의 형태 및 크기는 주파수 및 결합되는 증폭 모듈의 개수로 정할 수 있다. 내부 cavity는 다음의 식으로 최소 크기를 계산할 수 있다. W는 사용 대역에 맞는 도파관의 차단주파수를 고려하여 결정하면 된다. 본 논문에서는 WR-28 EIA 규격을 적용하였다.

나. 공간결합기 시뮬레이션

시뮬레이션은 EM Simulation Tool을 이용하여 진행하였으며 결합기에 대한 출력삽입손실과 입출력 반사손실과 같은 주파수에 대한 특성을 확인해야 하기 때문에 S-matrix를 기준으로 시뮬레이션 및 튜닝을 하였다.

표 2. 8-way radial combiner simulation 검토 사항
 Table 2. 8-way radial combiner simulation reviews

항 목	검토 내용
주파수	29 - 31GHz
결합 개수	8-way
connector 사양	2.92mm 적용
결합기 크기	최소 크기

그림 2는 결합기의 삽입손실과 반사손실의 시뮬레이션 결과 그래프이다. 삽입손실은 입력 커넥터에서 출력 커넥터로 신호가 진행할 때 손실되는 정도를 의미하고 반사손실은 신호가 인가되는 커넥터 기준으로 반사되는 정도를 의미한다. 설계대역 내에서 삽입손실은 약 9.11dB 이하, 출력 커넥터 반사손실은 약 22dB 이하, 결합 커넥터 반사손실은 약 16dB 이하의 결과를 얻었다.

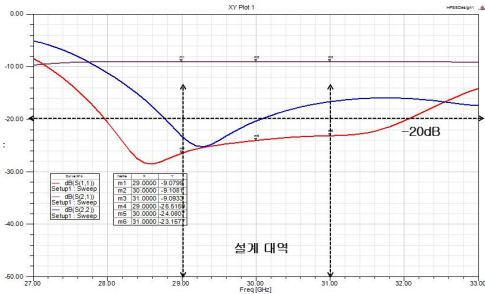


그림 2. 삽입손실 및 반사손실
 Fig. 2. Insertion loss and Return loss

결합되는 커넥터들의 삽입손실을 시뮬레이션한 결과를 다음 그림으로 나타내었다. 사용 주파수 대역내에서는 31GHz가 변화폭이 제일 크며 값을 분석한 결과 커넥터별 최대 삽입손실과 최소 삽입손실의 차가 약 0.14dB 정도 계산되었다.

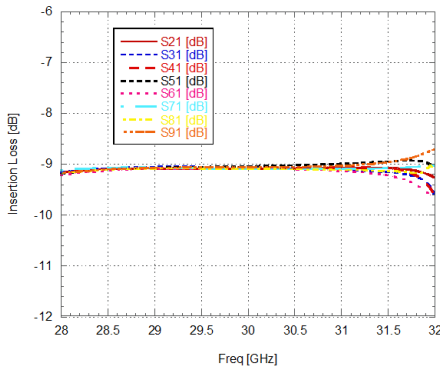


그림 3. 결합 커넥터별 삽입손실 및 반사손실
 Fig. 3. Insertion loss and Return loss per combining connector

그림 4는 커넥터 별 위상에 대한 시뮬레이션 결과이다. 확대되어진 그림을 통해 위상값의 최소와 최대의 차이가 1도 이하임을 알 수 있다. 그러나 실제 제작되어지는 커넥터 내부 pin 길이 및 조립 시 기구 평탄도 오차, 그리고 커넥터가 삽입되는 부분의 under cut 깊이에 따라 제작되는 결합기의 커넥터 별 위상차는 더 커질 것으로 예상된다.

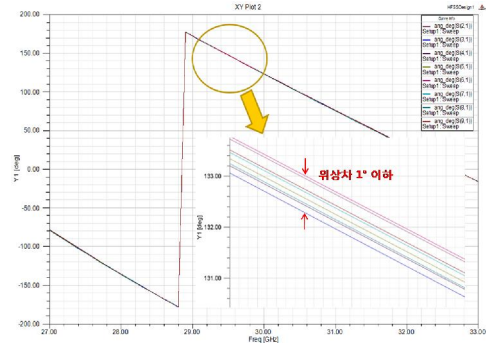


그림 4. 커넥터 별 위상 비교
 Fig. 4. Phase comparison per combining connector

마지막으로 전자기 해석 결과를 통해서 신호가 동위상으로 균등하게 분배되는 것을 확인하였다.

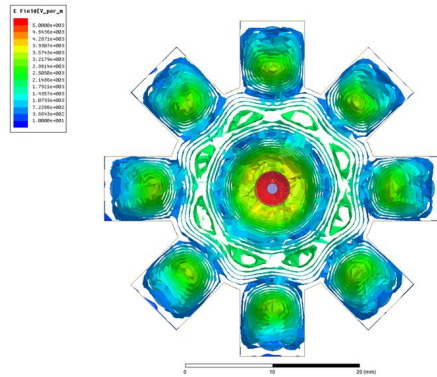


그림 5. 전자기 해석 : E-Field
 Fig. 5. Field analysis : E-Field

2. 단위증폭기

가. 단위 증폭기의 개요

본 논문의 전체 목표 규격 충족을 위해서는 단일 전력 증폭기 내부의 증폭기 소자 선정이 매우 중요하다. 최근 증폭기 소자는 GaN 공정 기술을 이용한 트랜지스터 또는 MMIC 형태로 개발된 제품이 다수의 국외 제조사에

서 개발 및 양산되고 있으며 종전 Si, GaAs 계열에 비해 전력밀도가 높아 제품의 소형화와 경량화가 가능하다. 아래 표에 본 과제에 적용 가능한 GaN HEMT 전력증폭기 MMIC의 주요 성능을 비교하였다.

최대 출력 전력 항목의 목표규격이 4W이상이므로 최대 출력 전력이 4W이상인 소자를 선정하였으며 출력단 손실을 고려하여 5W이상의 소자를 선별하였다.

그 중 TGA2594(QORVO)는 5W 이상이고 전력 부가 효율이 우수하며 소자 크기가 작아 소형화에 유리하다. 이런 장점을 고려하여 단일전력증폭기의 증폭소자로 TGA2594(QORVO)를 선정하였다.(표4 Ka대역 MMIC 소자 조사)

나. GaN HEMT 전력증폭부 설계

GaN HEMT 전력증폭기 패키지는 소자의 발열량 및 동작 주파수에 따라 다양한 형태로 구현 가능하다. Ku 대역 이하 동작 주파수 소자에 대한 패키지는 몸체와 덮개로 구성되어 차폐형 구조를 가진다. 특히 패키지 몸체는 소자의 발열량에 따라 세라믹 또는 금속 소재를 적용한다. 본 논문의 GaN HEMT 전력증폭기의 동작 주파수는 Ka 대역으로 매우 높아 패키지화에 따른 입출력 기생 성분에 따른 부가 손실로 인해 차폐형 구조적용이 어렵다. 따라서 설계 및 제작되는 전력증폭기부는 단일전력 증폭기의 일체형 구조를 적용하고자 한다.

일체형으로 제작되는 GaN HEMT 전력증폭부 MMIC, 입출력 전송선로 및 단층 커패시터로 구성된다.

이러한 회로를 포함하는 단일 전력증폭기의 외형도 및 조립도는 그림 6, 8과 같으며 전체 크기는 17.5 x 48.0 x 9.20mm이다. 단일 전력증폭기는 전체적으로 HMIC 공정으로 조립되며 완전 밀봉(Hermetic Sealing) 패키지 형태로 구현되어 온/습도에 대한 성능 변화를 최소화하고 EMI/EMC 등 환경 사양에 충족하도록 설계하였다.

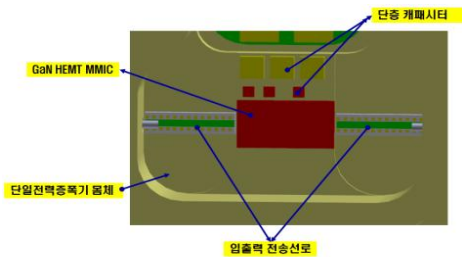


그림 6. GaN HEMT 전력증폭부 일체형 조립도
Fig. 6. GaN HEMT Power amplifier assembly

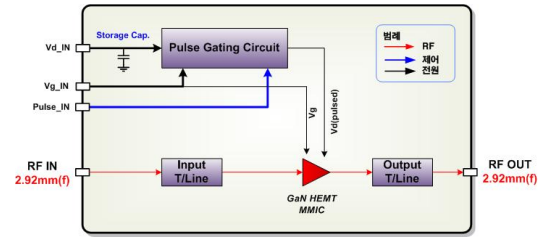


그림 7. 단일 전력증폭기 블록도
Fig. 7. Single Power amplifier block diagram

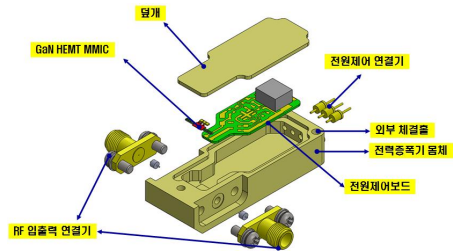


그림 8. 단일전력증폭기 조립도
Fig. 8. Single Power amplifier assembly diagram

다. 단일 전력증폭기 열해석

단일 전력증폭기에 대한 열 해석은 상온 25도와 고온 65도 조건에 대해 수행하였다. 열 해석을 위한 발열량은 GaN HEMT MMIC의 펄스 듀티 2% 동작 기준으로 약 0.9W로 산정하였다.

아래 그림에 상온과 고온 조건에서의 열 해석 결과를 나타내었다. 열 해석 결과 GaN HEMT MMIC 표면의 최대온도는 상온, 고온 조건에서 각각 39.6도, 79.2도로 해당 소자의 최대 접합 온도 275도 보다 매우 낮은 수치로 확인되었다.

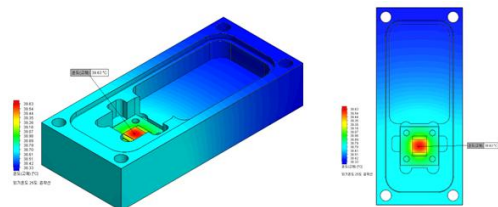


그림 9. 단일 전력증폭기 열 해석 결과(상온, 25도)
Fig. 9. Single Power amplifier thermal analysis results (room temperature, 25°C)

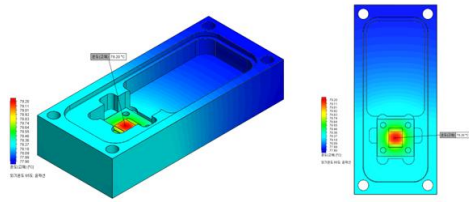


그림 10. 단일 전력증폭기 열 해석 결과(고온, 65도)
 Fig. 10. Single Power amplifier thermal analysis results (high temperature, 65°C)

III. 공간전력결합증폭기설계

1. 공간결합증폭기 개요

공간결합증폭기는 8-way 공간 결합기와 8개의 단일 전력증폭기를 연결하여 20W급 이상의 공간 결합 증폭기 제작을 목표로 하였다.

표 3. 공간결합증폭기 개발목표
 Table 3. Spatial combining amplifier development goals

항 목	개발 목표
주파수	29 ~ 31GHz
최대 출력 전력	10W 이상 (40dBm이상)
Pulse width	4us
Duty	2 %
전력 부가 효율	15 % 이상
선형 전력 이득	19 dB 이상

2. 공간 결합증폭기의 구성

가. 증폭기 제어부

증폭기 제어부는 시험 치구에서 입력되는 전원/제어 신호를 8개의 각 단일 전력증폭기에 분배/공급 해주는 역할을 수행하며 제작된 증폭기 제어부 형상은 다음 그림 11과 같다.

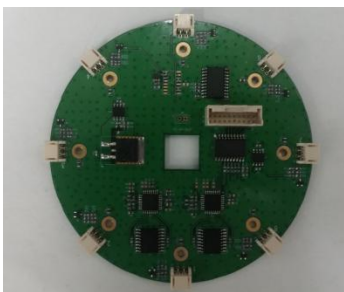


그림 11. 증폭기 제어부 제작 형상
 Fig. 11. amplifier bias control production shape

나. 기구 설계 형상

기구 형상은 크게 8개의 단일 증폭기를 지지하는 연결 브래킷과 두 개의 공간결합기 - 단일 전력증폭기 브래킷 사이를 체결하는 체결부로 나눌 수 있다.

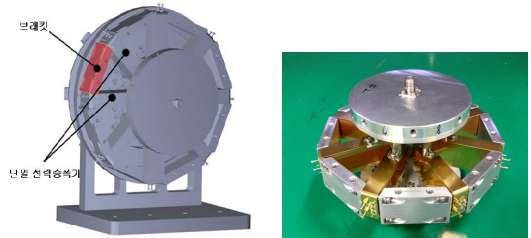


그림 12. 연결 브래킷 조립 3D 형상/제작 형상
 Fig. 12. Assembly of connection brackets 3D and production shapes

IV. 실험 및 결과

1. 공간결합기 제작 및 실험 결과

공간결합기는 그림13, 14와 같이 입출력 각각 1개씩 제작하였다. 30GHz, Air 기준으로 파장의 길이가 10mm 밖에 되지 않기 때문에 실제 결합기 제작시 작은 가공 오차에도 성능적인 면에서 많은 영향을 받을 수 밖에 없다. 이러한 가공오차에 대한 영향을 상쇄하고자 최소 오차를 적용하여 가공을 진행하였다. 결합기 단품으로는 전체 삽입손실을 계산할 수 없기 때문에 결합기 조립체 2EA를 2.92mm to 2.92mm adapter를 이용하여 Back-to-back 구조로 조립하여 S-parameter 측정을 하였다. Back-to-back 구조로 측정하였을 때 삽입 손실이 최대 0.668dB이므로 개별 결합기 손실은 최대 0.334dB로 계산되었고 입력 반사손실은 21.3dB 이하, 출력 반사손실은 20.2dB 이하의 값을 얻었다.

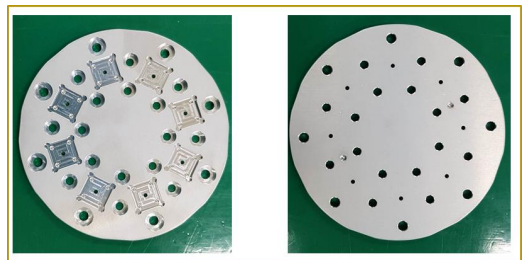


그림 13. TOP 기구 앞면 및 뒷면 제작사진
 Fig. 13. TOP instrument production photos

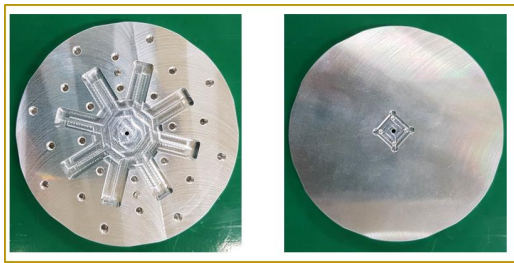


그림 14. BOTTOM 기구 앞면 및 뒷면 제작사진
Fig. 14. BOTTOM instrument production photos

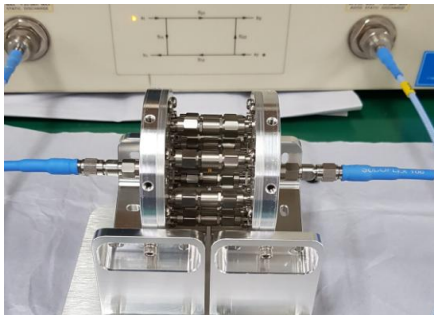


그림 15. 전체 결합사진 : back-to-back 연결
Fig. 15. combination photos : back-to-back



그림 16. 입력부 및 출력부 back-to-back 결합 측정 : 반사 손실 및 삽입손실
Fig. 16. Input & Output back-to-back measurement : return loss & insertion loss

표 4. 공간결합기 측정 결과

Table 4. Radial Combiner measurement results

항 목	목표 사양	측정 결과
주파수	29 ~ 31GHz	29 ~ 31GHz
삽입손실	0.7dB 이하	0.334 dB 이하
입력 반사손실	10dB 이하	21.3 dB 이하
출력 반사손실	10dB 이하	20.2 dB 이하

2. 단일 증폭기 제작/실험결과

단위증폭기는 총 8개의 단일 전력증폭기가 소요되므로 개별 단일전력증폭기는 그림 17과 같이 제작 실험하여 원하는 규격을 만족함을 확인하였다. 측정시 주파수는 29.0 ~ 31.0GHz로 설정하였고 입력신호 레벨은 +15dBm, 펄스폭은 4us, duty cycle은 2%로 설정하여 진행하였다.

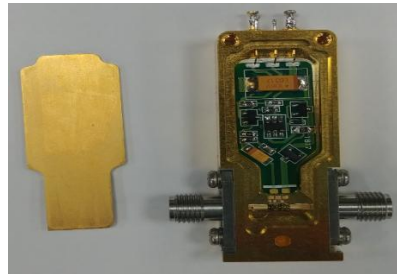


그림 17 단일전력증폭기 내부사진
Fig. 17. Single power amplifier inner photos

표 5. 단일전력증폭기 시제별 측정 결과

Table 5. Single power amplifier measurement results : #1 ~ #8

시제 번호	최대 출력 전력 [W]	전력 부가 효율 [%]	선형 전력 이득[dB]	이득 평탄도 [dB]	소모전류 [mA]
목표 사양	4.0 이상	22.0 이상	20.0 이상	±2 이하	-
#1	4.5	28.4	28.7	±0.5	16
#2	4.1	24.3	27.0	±0.5	17
#3	4.1	24.1	26.5	±1.0	16
#4	4.0	23.4	24.1	±1.5	17
#5	4.5	24.6	27.5	±0.5	18
#6	4.1	27.8	27.7	±0.4	16
#7	4.5	28.6	27.4	±0.4	16
#8	4.4	26.2	26.7	±0.4	16
평균	4.28	25.5	27.0	16.5	16.5

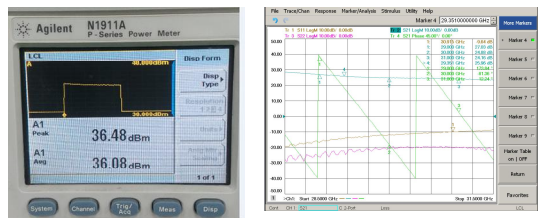


그림 18. 단일증폭기 출력전력 결과/소신호이득 및 위상 파형
Fig. 18. Single power amplifier measurement results : output power, small signal gain and phase

3. 공간 결합 증폭기 측정 결과

상기 8-way 공간결합기와 단위증폭모듈 8EA를 이용하여 공간결합증폭기를 제작 및 조립하였다. 다음 그림 23 은 전체 조립된 사진이다.

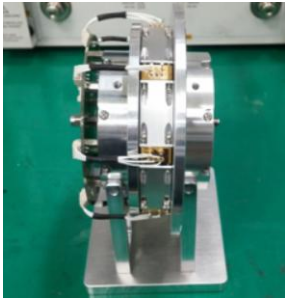


그림 19. 공간결합증폭기 조립사진
 Fig. 19. Spatial combining amplifier assembly photos

Pulse width 4us, Duty 2% 조건에서 측정하였으며 측정 결과 최소 출력 전력 30.1W, 선형 전력 이득 26.4 dB의 값을 얻었으며 계산결과 전력부가효율은 약 19.07%가 되는 것을 확인하였다.

표 6. 공간결합증폭기 개발목표 및 측정결과
 Table 6. Spatial combining amplifier development goals and measurement results

항 목	개발 목표	측정 결과
주파수	29 ~ 31GHz	29 ~ 31GHz
최대 출력 전력	10W 이상 (40dBm 이상)	30.1W (44.79dBm)
Pulse width	4us	4us
Duty	2%	2%
전력 부가 효율	15% 이상	19.07%
선형 전력 이득	19dB 이상	26.4dB



그림 20. 선형 전력 이득 측정 파형
 Fig. 20. Linear power gain measurement waveform

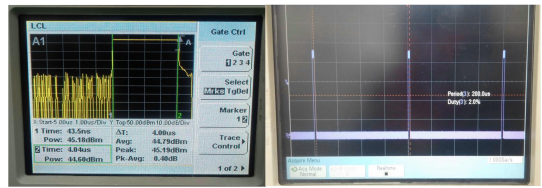


그림 21 출력전력 /Pulse width/ duty 측정파형
 Fig. 21. Output power / Pulse width / Duty cycle measurement waveform

V. 결 론

밀리미터파 대역에서 SSPA를 초소형으로 개발 시 기본적으로 소자의 낮은 효율로 인해서 발생하는 발열문제는 항상 따라다닐 수밖에 없다. 이러한 문제를 해결하고자 본 논문에서는 GaAs 소자에 비해 높은 출력 밀도를 갖는 GaN HEMT MMIC를 이용하여 단일 전력증폭기를 제작하였으며 또한 일반적인 마이크로 스트립라인에 비해 높은 결합 효율 특성을 갖는 공간결합기를 적용하여 입력 분배부 및 출력 결합부를 제작하였다. 이러한 구성을 적용하여 SSPA를 제작하였으며 측정결과 Ka 대역 (29~31GHz)에서 최대 출력 30.1W 와 19.07%의 전력부가 효율값을 얻을 수 있었다.

References

- [1] A. E. Fathy, Sung-Woo Lee, D. Kalokitis "A simplified design approach for radial power combiners," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume 54, Issue 1, pp. 247-255, Jan 2006.
 DOI: 10.1109/TMTT.2005.860302
- [2] D. FitzPatrick, "Recent Developments in High Power SSPAs - A European Perspective," IEEE International Microwave Symposium, USA, 2013.
- [3] Song, Kaijun, et al. "Ku-band 200-W pulsed power amplifier based on waveguide spatially power-combining technique for industrial applications." IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61.8 (2014): 4274-4280.
 DOI: 10.1109/TIE.2013.2284137
- [4] Sun-il kim, Sung-il Park "Design and fabrication

of SSPA module in Ku band for satellite terminals”, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 16, No. 4, pp. 59-64, Aug 2016.

DOI : 10.7236/JIIBC.2016.16.4.59

[5] K. J. Russell, “Microwave Power Combining Techniques”, IEEE trans. Microw. Theory Tech., vol. MTT-27, no. 5, 1979.

DOI: 10.1109/TMTT.1979.1129651

[6] 최진주, 초고주파 공학 2판, INFINITY BOOKS, 2007.

[7] Ji, Hong-Gu, GaN HPA Monolithic Microwave Integrated Circuit for Ka band Satellite Down Link Payload, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 16 Issue 12, PP. 8643-8648, 2015..

DOI: 10.5762/KAIS.2015.16.12.8643

이 수 현(정회원)



- 2009년 2월: 대진대학교 통신공학과 (공학사)
- 2011년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2018년 11월~현재: (주)제트에이치티 선임연구원
- 주 관심분야: RF power Amplifier, Spatial Combiner, Radial Combiner, Waveguide

안 세 환(정회원)



- 2004년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2006년 2월: 숭실대학교 정보통신공과 (공학석사)
- 2007년 1월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야: 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기

저자 소개

최 영 락(정회원)



- 1999년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
- 2003년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2008년 1월~현재: (주)제트에이치티 수석연구원
- 주 관심분야: 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기, 주파수합성기

이 중 우(정회원)



- 2003년 2월: 동의대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2005년 2월: 동의대학교 정보통신공과 (공학석사)
- 2005년 1월~2008년 7월: (주)피플웍스 주임연구원
- 2008년 9월~현재: (주)제트에이치티 책임연구원
- 주 관심분야: 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기, 주파수합성기

이 만 희(정회원)



- 2007년 2월: 충남대학교 전기정보통신공학부 (공학사)
- 2009년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2009년 1월~현재: LIG넥스원(주) 선임연구원
- 주 관심분야: 마이크로웨이브 탐색기, 초고주파 회로 및 시스템

김 홍 락(정회원)



- 1995년 2월: 대구대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
- 1997년 8월: 대구대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1997년 7월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원
- 주 관심분야: 초고주파 회로 설계, 마이크로파 신호처리, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기

※ 본 논문은 국방기술품질원의 재원으로 국방벤처지원사업의 지원을 받아 연구되었음
(과제번호 : V170010)