

레디알 전력 결합기를 이용한 고출력 증폭기

High Power Amplifier using Radial Power Combiner

최종운¹ · 윤영철¹ · 김영²

¹가톨릭관동대학교 전자공학과

²금오공과대학교 전자공학부

Jong-Un Choi¹ · Young-Chul Yoon¹ · Young Kim²

¹Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University, Gangwon-do, 25601, Korea

²School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do, 39177, Korea

[요약]

본 논문은 삽입 손실이 작은 레디알 전력 결합기를 이용하여 낮은 전력의 증폭기 8개를 결합하여 고출력 증폭기를 구현한 것이다. 구현된 레디알 전력 결합기는 8개의 입력 포트를 갖고 있는 비공진형 특성을 갖고 있으며 마이크로스트립으로 구현하였고, 1.045 GHz 동작 주파수에서 확인한 결합기의 특성은 삽입손실 0.7 dB, 반사손실 12 dB 이상을 얻었다. 또한, 사용된 낮은 전력의 증폭기는 AFT27S010NT1 트랜지스터를 이용하여 설계하였으며, 동작 주파수에서 동일한 이득, 위상 및 일정한 출력 특성을 만족하도록 설계하였다. 제작된 레디알 전력 결합기와 8 W 출력의 드라이브 증폭기를 이용하여 낮은 전력의 증폭기 8개 구동시켜서 결합한 고출력 증폭기는 1.045 GHz 동작 주파수에서 33 W의 출력 특성을 얻었다. 또한, 낮은 전력 증폭기가 고장이 발생했을 때 레디알 결합기를 이용한 증폭기의 출력특성이 점진적으로 열화되는 결과를 확인하였다.

[Abstract]

This paper describes a high power amplifier combining eight low power amplifiers using a radial power combiner with low insertion loss. The radial power combiner is a non-resonant type combiner with 8 input ports and is implemented by microstrip transmission line. The combiner characteristics designed at operating frequency of 1.045 GHz have an insertion loss of 0.7 dB and a return loss of more than 12 dB. Also, the low power amplifier used was designed with AFT27S010NT1 transistor and designed to satisfy the same gain, phase and constant output characteristic at operating frequency. The high power amplifier, which combines the radial power combiner and the drive amplifier of 8 W output by driving low power amplifiers obtained the output characteristic of 33 W at operating frequency of 1.045 GHz. Also, the change of the output characteristic of the amplifier using the radial combiner was graceful degradation when the low power amplifier failed one by one.

Key word : Combining technology, Graceful degradation, Power amplifier, Radial combiner.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.6.626>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 21 November 2017; Revised 27 November 2017

Accepted (Publication) 13 December 2017 (30 December 2017)

Corresponding Author; Young Kim

Tel: +82-54-478-7506

E-mail: youngk@kumoh.ac.kr

I. 서 론

전력 결합기는 RF/ 마이크로웨이브 시스템에서 사용되는 가장 중요한 요소이다. 예전에는 고출력 전력 증폭기로 TWT (traveling wave tube)가 레이더, 위성 통신 및 무선통신에 사용되었지만, 최근에는 고출력 SSPA(solid state power amplifier)를 이용한 증폭기가 높은 효율과 제작상의 편리함의 장점 때문에 많이 사용되고 있다.

전력증폭기 설계의 중요한 요소는 전력, 대역폭, 효율, 선형성 및 잡음이 존재한다. 하나의 트랜지스터를 갖고 이러한 특성을 모두 만족하는 전력 증폭기를 설계하는 것은 매우 어려운 일이다. 특히 고출력 전력증폭기 특성을 얻을 수 있는 방법은 낮은 전력의 증폭기를 다수 결합하여 높은 전력의 증폭기를 구현하는 방법이 존재한다. 먼저 전력 평면 결합방식 [1]-[5]은 윌킨슨, 하이브리드 커플러, 링 하이브리드, 정션 결합기 및 지젤 결합기가 존재하며, 또 다른 방법으로 공간 결합방식[6]-[10]은 공간 결합기, 레디알 결합기, 웨이브가이드 결합기, 코니칼 결합기 및 캐비티 결합기가 존재한다.

최근의 전력 증폭기는 작은 크기에 큰 전력을 얻을 수 있는 구조를 선호하고 있는데, 대표적인 전력 평면 결합방식인 윌킨슨 결합기를 이용한 전력증폭기는 결합하고자하는 증폭기의 숫자에 따라서 전력증폭기의 크기가 커지며 전송선로 길이증가와 결합방식으로 인하여 큰 손실이 발생하여 전체적인 효율이 나빠지는 특징을 갖고 있다. 또한, $\lambda/4$ 전송선로를 이용하여 구현되어지기 때문에 그 크기를 줄이는 것은 한계를 갖고 있다. 하지만 공간 결합 방식 결합기인 레디알 구조의 결합기는 다수의 낮은 전력 증폭기를 동시에 결합하는 방식을 사용하기 때문에 작은 손실과 높은 결합 효율을 갖고 있는 장점이 존재한다.

본 논문에서 구현한 레디알 전력 결합기는 8개의 입력 포트가 존재하고 결합기 중심에 있는 출력 포트 기준으로 대칭적으로 입력 포트가 배치되어 있으며, 입력되는 신호가 한번의 결합으로 출력 전력을 만들기 때문에 결합 손실이 작다. 또한, 8 W의 드라이브 증폭기를 이용하여 8 W 급의 낮은 전력의 단일 증폭기 8개를 구동시켜서 이것의 출력을 레디알 전력 결합하여 33 W 출력의 전력증폭기를 구현하였다.

논문의 구성은 전력 결합기와 증폭기 설계에 대한 내용과 이것들의 실험결과에 대한 서술로 구성되어 있다.

그림 1은 본 논문에서 구현하고자하는 고출력 전력 증폭기의 전체 구성도를 나타낸 것이다.

II. 전력 결합기와 증폭기 설계

2-1 레디알 전력 결합기

일반적으로 N-way 레디알 전력 결합기는 N개의 출력

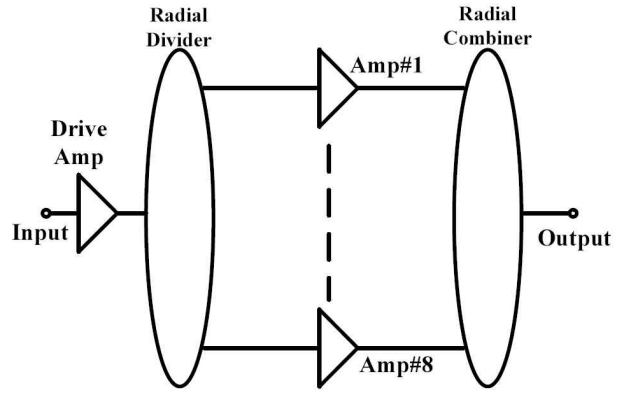


그림 1. 레디알 전력 결합기를 이용한 고출력 증폭기 구성도
 Fig. 1. Configuration of high power amplifier using radial power combiner.

포트와 한 개의 입력포트로 구성되어 있는 (N+1) 포트 네트워크이다. 만일 N개의 출력포트와 입력포트가 정합되어 있다면 다음과 같은 형태의 S-파라미터를 얻을 수 있다.

$$(S) = \begin{pmatrix} 0 & S_{12} & S_{12} & S_{12} & \dots & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{23} & \dots & S_{23} \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & S_{23} & \dots & S_{23} \\ S_{12} & S_{23} & S_{23} & S_{22} & \dots & S_{23} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{12} & S_{23} & S_{23} & S_{23} & \dots & S_{22} \end{pmatrix} \quad (1)$$

이 소자는 무 손실이며, 출력 포트의 VSWR (voltage standing wave ratio)과 출력 포트사이의 고립도 그리고 입력과 출력 포트사이의 결합도는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [11-13].

$$|S_{12}|^2 = \frac{1}{N} \quad (2)$$

$$|S_{23}|^2 = \frac{1}{N^2} \quad (3)$$

$$|S_{22}| = \frac{N-1}{N} \quad (4)$$

$$VSWR_{N(N \neq 1)} = \frac{1 + |S_{22}|}{1 - |S_{22}|} = 2N - 1 \quad (5)$$

$$Isolation_{(MN)} = 10 \log \frac{1}{|S_{23}|^2} = 20 \log N \quad (6)$$

$$(M \neq 1, N \neq 1, M \neq N)$$

$$Coupling_{1N(N \neq 1)} = 10 \log \frac{1}{|S_{12}|^2} = 10 \log N \quad (7)$$

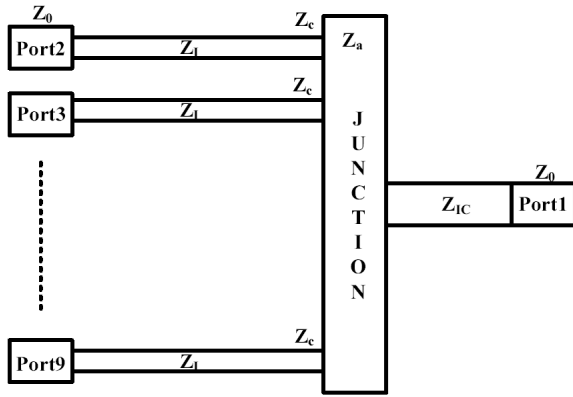


그림 2. 8-way 레디알 전력 분배기의 전송선로
Fig. 2. A transmission lines 8-way radial power divider.

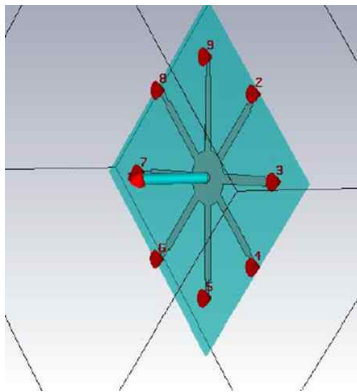


그림 3. 시뮬레이션 설계도면
Fig. 3. Simulated PCB design drawing.

앞의 (5) ~ (7)식을 바탕으로 8-way 레디알 결합기의 VSWR = 17, 입출력 사이의 결합도는 9 dB 그리고 입력 포트사이의 고립도는 18 dB가 됨을 알 수 있다.

마이크로스트립으로 레디알 결합기를 구현하기 위하여 그림 2에 나타난 임피던스 Z_a 는 반지름이 r_a 인 레디알 라인 임피던스를 나타내며 그 값은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_a = \frac{h}{2\pi r_a} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_r \epsilon_o}} \quad (8)$$

여기서 h 는 PCB의 유전체 두께를 나타내며, ϵ_r 은 PCB의 유전체 상수를 그리고 μ 는 자화율 상수를 나타낸 것이다.

이 임피던스가 N 개의 포트에 나누어지면 이 각 포트의 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_c = \frac{N h}{2\pi r_a} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_r \epsilon_o}} \quad (9)$$

그림 2는 식 (8) ~ (9)를 이용하여 8-way 레디알 전력 결합기를 구성하는 전송선로를 나타내었다.

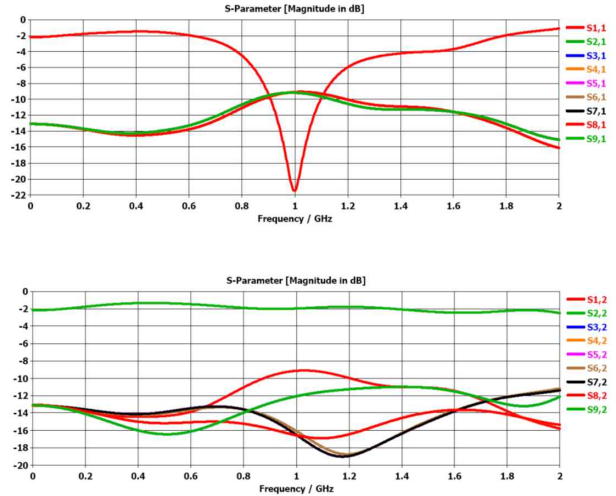


그림 4. 레디알 전력 결합기의 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulated results of radial power combiner.

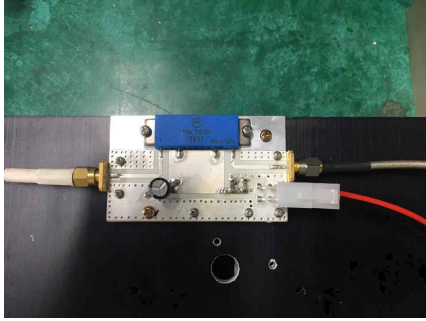
또한, Z_1 , Z_c 는 입출력 정합을 위한 $\lambda/4$ 임피던스 변환기의 임피던스를 나타낸 것이다. 사용된 PCB는 유전율이 4.4, PCB 두께는 1.578 mm, 그리고 동박 두께 0.035 mm의 에폭시 PCB를 사용하였다.

이런 데이터를 바탕으로 정선 부분의 임피던스는 $Z_a = 3 \Omega$, 8개의 입력부분과 연결되는 임피던스는 $Z_c = 24 \Omega$ 로 계산되었으며 이것을 정합시키기 위해서 $Z_1 = 34.6 \Omega$ 임피던스를 갖는 $\lambda/4$ 전송선로를 사용하였다. 또한 포트 1과 정합을 시키기 위해서 $Z_{1C} = 12.25 \Omega$ 의 $\lambda/4$ 동축 케이블을 설계하여 50 Ω 과 정합시켰다. 이것을 바탕으로 CST 소프트웨어를 이용한 설계한 도면은 그림 3에 나타내었고, 이것의 시뮬레이션 결과는 그림 4에 나타내었다.

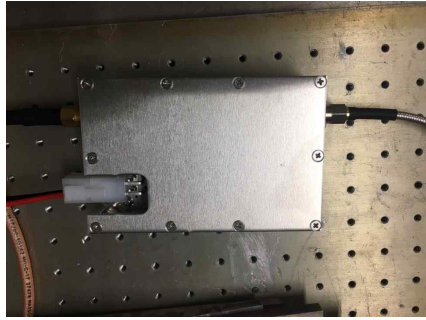
2-2 증폭기

레디알 결합기를 이용한 고효율 증폭기를 드라이브하기 위해서 그림 5(a)의 드라이브 증폭기를 제작 사용하였고, 이 증폭기는 NXP사의 MHL9838 LDMOS로 제작되었고 이득은 31 dB, 8 W의 출력을 얻었다. 드라이브 증폭기의 반사계수, 이득 및 출력 특성 그래프는 그림 6에 나타내었다. 측정된 드라이브 증폭기 출력의 P_{1dB} 는 6.2 W이며, 이때 사용 전원 전압은 28 V, 바이어스 전압은 760 mA 그리고 동작주파수는 1.045 GHz에서 측정하였다.

또한, 그림 5(b) 증폭기는 낮은 출력 증폭기로서 NXP사의 AFT27S010NT1 트랜지스터를 사용하여 입출력에 ATC 캐패시터를 사용하여 1 GHz 부근에서 출력이 나올 수 있도록 정합회로를 구현하였고, 레디알 전력 결합기의 포트간 고립도를 고려하여 외부에서 입력되는 높은 전력으로부터 회로를 보호하기 위하여 파트론사의 G947 아이솔레이터(isolator)를 삽입하였다. 이 증폭기의 측정된 출력의 P_{1dB} 는 4.7 W이다.



(a)



(b)

그림 5. (a) 드라이브 증폭기 (b) 낮은 출력 증폭기
 Fig. 5. (a) drive amplifier (b) low power amplifier.

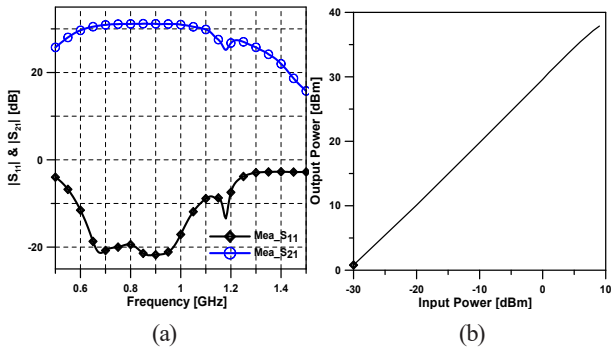


그림 6. 드라이브 증폭기 출력 특성 (a) $|S_{11}|$, $|S_{21}|$ (b) 출력 전력
 Fig. 6. Output characteristics of drive amplifier (a) $|S_{11}|$, $|S_{21}|$ (b) output power.

낮은 전력 증폭기 특성은 동작 주파수에서 최대출력 4.7 W까지 선형적으로 증폭하는 것을 확인하였고, 이때 측정 조건은 전원 전압이 28 V, 바이어스 전류는 90 mA 그리고 동작주파수는 1.045 GHz에서 측정하였다.

III. 실험결과

앞에서 설계한 레이디알 전력 결합기를 이용한 고출력 증폭기를 구현하기 위해서 먼저, 에폭시 PCB를 사용하여 구현된 레이디알 전력 결합기 PCB와 구조물을 제작하여 전기적인 특성을 확인하였다.

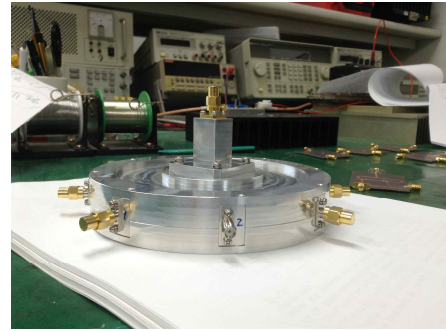
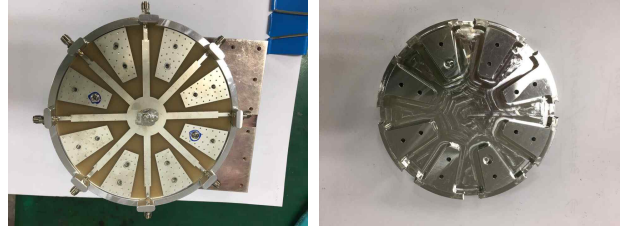


그림 7. 레이디알 전력 결합기 내부 구조 및 조립 사진
 Fig. 7. Photograph of radial power combiner with internal structure and assembly.

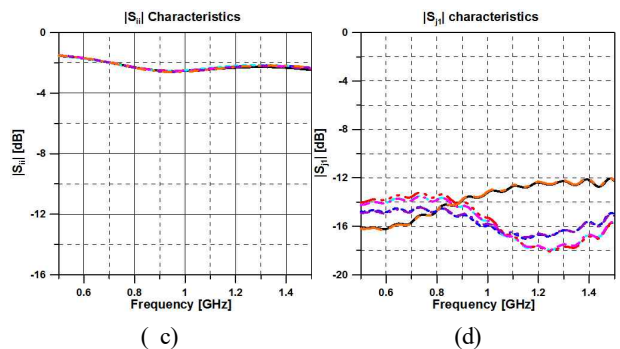
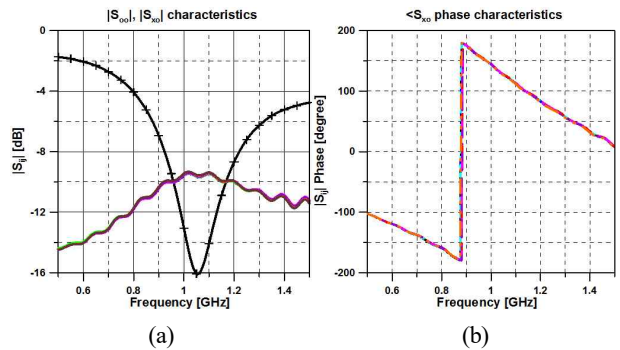


그림 8. 레이디알 전력 결합기의 S-파라미터 특성 (a) 출력 포트 반사계수와 삽입손실 (b) 입력과 출력사이의 위상 (c) 입력포트 반사계수 (d) 입력포트 사이의 고립도
 Fig. 8. S-parameter characteristic of radial power combiner (a) output port return loss and insertion loss (b) phase between input and output ports (c) input port return loss (d) isolation between input ports.

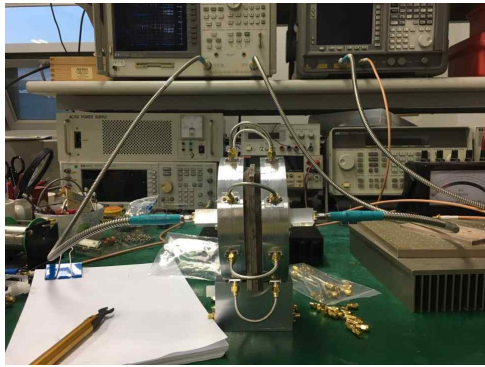


그림 9. 레디알 전력 결합기 두 개를 연결한 사진
 Fig. 9. Photograph of two radial power combiner connected.

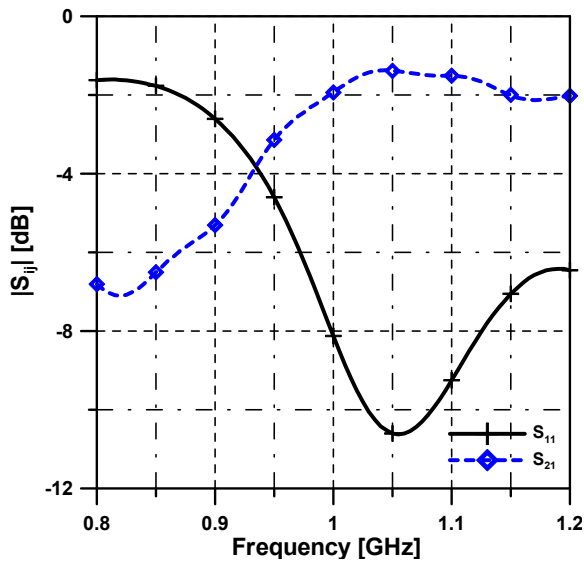
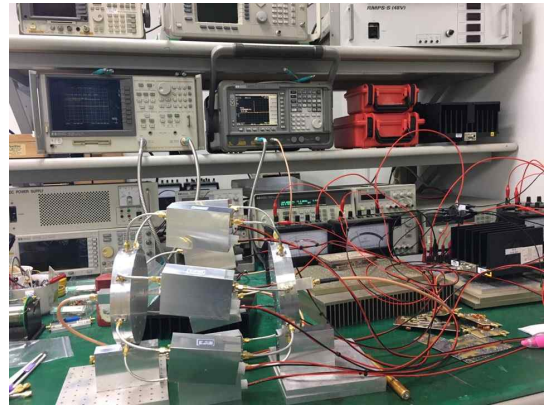


그림 10. 두 개 연결된 레디알 전력 결합기 S-파라미터 특성
 Fig. 10. S-parameter characteristics of two connected radial power combiner.

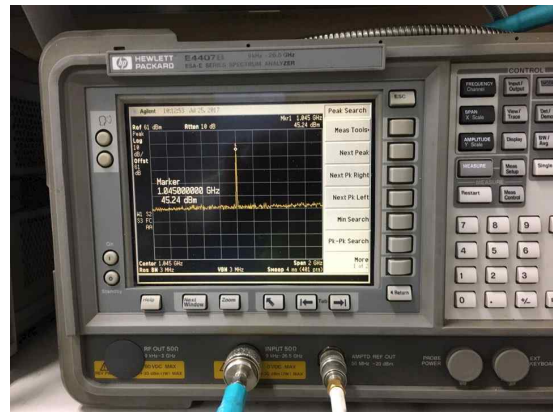
그림 7은 레디알 전력 결합기의 PCB가 조립된 내부 사진과 전체 조립된 구조 사진을 나타낸 것이다. 이렇게 조립된 레디알 전력 결합기의 전기적 특성은 그림 8에 나타내었다.

동작 주파수 1.045 GHz에서 출력포트의 반사계수는 16 dB, 출력에서 입력 포트사이의 삽입 손실은 9.6 dB가 측정되었고, 출력에서 입력 포트사이의 위상 차이는 ±1.5°이며, 8개의 입력 포트의 반사계수는 2.5 dB 이하가 측정되었으며, 입력 사이의 고립도는 13 ~ 16 dB가 측정되는 것을 확인하였다. 이것은 이론적인 값보다 더 좋은 결과를 얻었음을 알 수 있다.

제작된 2개의 레디알 전력 결합기 특성은 기구적인 오차와 조립상의 오차로 인하여 전기적인 특성이 차이가 발생하는 것 고려하여 두 개의 레디알 결합기를 연결하여 그 특성을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 11. (a) 레디알 전력 결합기와 8개의 증폭기 연결된 고출력 전력 증폭기 사진 (b) 출력 스펙트럼 결과

Fig. 11. (a) High power amplifier photograph of radial power combiner and 8 amplifier connected (b) Photograph of output spectrum result.

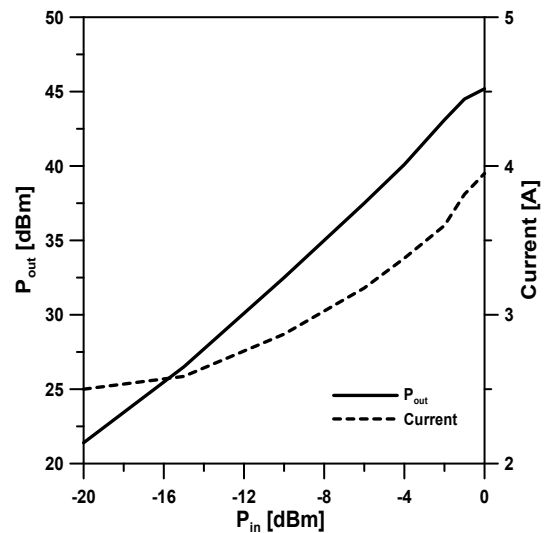


그림 12. 고출력 전력 증폭기의 출력 특성

Fig. 12. Output power characteristics of high power amplifier based on radial power combiner.

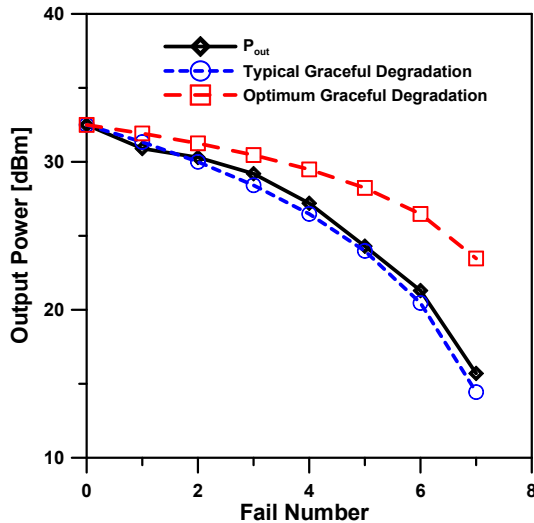


그림 13. 낮은 전력 증폭기의 고장에 따른 출력 전력 변화
 Fig. 13. Output power variation due to low power amplifier failure.

그림 9는 레디알 결합기의 특성을 확인하기 위하여 두 개의 결합기를 10 cm의 플렉시블 케이블로 연결한 상태의 사진이며, 이것을 측정된 결과는 그림 10에 나타내었다.

두 개 연결한 레디알 결합기의 특성을 바탕으로 개별 레디알 결합기의 삽입손실은 그래프에서 보이는 값을 반으로 나눈 것이며 동작 주파수 1.045 GHz에서 0.7 dB 임을 알 수 있으며 반사계수는 10 dB 이상임을 알 수 있다.

이러한 레디알 결합기와 앞에서 측정된 드라이브 증폭기 및 낮은 전력 증폭기를 모두 연결하여 고풍력 전력 증폭기 특성을 확인하였다.

그림 11은 레디알 전력 결합기와 낮은 전력증폭기가 모두 연결된 사진과 고풍력 증폭기의 출력 스펙트럼 사진을 나타내었다.

그림 12는 레디알 전력 결합기를 이용한 고풍력 증폭기의 입력 전력에 따른 출력전력과 그때의 전류를 그래프로 나타내었다. 이 그래프를 살펴보면 증폭기의 이득은 45 dB 그리고 최대 출력은 45.2 dBm (33.1 W)임을 알 수 있다. 이때 최대 전류는 3.95 A로 측정되었으며 이것을 통해서 증폭기의 효율은 30 % 가 되는 것을 확인하였다.

또한 그림 13은 레디알 전력 결합기와 낮은 전력증폭기가 모두 연결된 상태에서 입력레벨을 조정하여 최대 출력이 1.8 W로 설정한 후, 낮은 전력 증폭기가 고장 발생시 출력 변화를 나타낸 그래프이다. 이것은 기존 윌킨슨 분배기를 이용한 전력증폭기에서 개별 증폭기가 고장 발생시 출력변화와 비교해 보면 레디알 증폭기를 이용한 전력증폭기의 출력이 완만하게 줄어드는 것을 알 수 있으며 이것을 우아한 열화(graceful degradation)[6] 라고 한다. 측정된 데이터는 일반적인 우아한 열화 특성보다는 더 나은 특성이 있음을 알 수 있다

IV. 결 론

본 논문은 레디알 전력 결합기를 이용하여 8 W급의 낮은 전력증폭기를 8개 결합하여 33 W 고풍력 전력증폭기를 구현한 논문으로, 작은 손실의 레디알 전력 결합기를 설계하였으며 낮은 전력 증폭기와 드라이브 증폭기를 제작하였다. 또한, 레디알 전력 결합기를 이용한 증폭기는 낮은 전력 증폭기가 고장이 발생해도 출력 변화에는 영향이 작음을 확인하였다.

여기서 설계한 레디알 전력 결합기와 전력증폭기 기술을 활용하면 수백 KW급의 전력 또는 수십 GHz의 주파수에서 고풍력 증폭기를 구현하는 것이 가능할 것이다.

Acknowledgments

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

References

- [1] K. J. Russel, "Microwave power combining techniques," *IEEE Transaction of Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-27, No. 5, pp. 472-478, May1979.
- [2] E. Wilkinson, "An N-way hybrid power divider," *IRE Transaction of Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-8, pp. 116-118, Jan.1960.
- [3] U. H. Gysel, "A new N-way power divider/combiner suitable for high power applications," in *Proc. 1975 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Palo Alto, CA, pp.116-118, May1975.
- [4] N. Nagai, "New N-way hybrid power dividers," in *Proc. 1977 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, San Diego, CA, pp. 503-505, Jun.1977.
- [5] Z. Galani and S. J. Temple, "A broadband planar N-way combiner/divider," in *Proc. 1977 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, San Diego, CA, pp. 499-502, Jun.1977.
- [6] A. E. Fathy, S.W. Lee, and D. Kalokitis, "A simplified design approach for radial power combiners," *IEEE Transaction of Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 1, pp. 247-255, Jan.2006.
- [7] J. M. Schellenberg and M. Cohn, "A wideband radial power combiner for FET amplifiers," in *IEEE International Solid State Circuits Conference*, San Francisco, CA, pp.164-166, Feb.1978.

- [8] Dirk I. L. de Villers, Pieter W, "Design of conical transmission line power combiners using tapered line matching sections," *IEEE Transaction of Microwave Theory and Techniques*, Vol. 56, No. 6, pp. 1478-1484, Jun. 2008.
- [9] M. D. Abouzahra and K. C. Gupta, "Multiple-port power divider/combiner circuits using circular microstrip disk configurations," *IEEE Transaction of Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-35, No. 1, pp. 1296-1302, Dec.1987.
- [10] Sushim Mukul Roy, Isaac Balbin, " Novel N-way power divider and array configuration for RFID reader operating 5.8 GHz," in *2008 IEEE International Conference on RFID*, The Venetian, Las Vegas, Nevada, pp.89-96, Apr.2008.
- [11] E. Belohoubek, R. Brown, H. Johnson, A. Fathy, D. Bechtle, D. Kalokitis, and E. Mykiety, "30-way radial power combiner for miniature GaAs FET power amplifiers," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Baltimore, MD, pp.515-518, Jun.1986.
- [12] A. Fathy and D. Kalokitis, " Analysis and design of a 30 way radial combiner for Ku-band applications," *RCA Rev.* Vol. 47, pp. 487-508, Dec.1986.
- [13] H. Kagan, " N-way power divider," *IRE Transaction of Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-9, Vol. 2, pp. 198-199, Mar.1961.



최종운 (Jong-Un Choi)

2001년 2월 : 관동대학교 전자공학과 (공학사)
 2017년 9월 ~ : 가톨릭관동대학교 전자공학과 석박사통합과정
 2009년 1월 ~ 현재 : 하이테크 대표
 ※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로설계



윤영철 (Young-Chul Yoon)

1978년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1989년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1987년 9월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로설계



김영 (Young Kim)

1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사), 2002년 8월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 1988년 1월 ~ 1993년 5월 : 이즈텔 시스템즈(주) 연구소 선임연구원
 1993년 6월 ~ 1998년 2월 : 삼성전자(주) 정보통신사업본부 선임연구원
 1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수
 2003년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수
 ※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계