

Gysel 전력결합기를 이용한 고출력 X-band SSPA 설계

이상록* · 임은재** · 이영철**

High power X-band SSPA Design using Gysel Power Combiner

Sang-Rok LEE* · Eun-Jae Lim** · Young-Chul Rhee**

요 약

산악지형이 많은 한국 실정에서 국지적으로 발생하는 기상자료를 제공하기 위하여 진공관식 레이더 보다는 반도체를 이용한 소형의 X-band 기상레이더의 필요성이 요구되고 있다. 기상레이더의 이중 편파방식에 사용되는 반도체형 전력증폭기(SSPA)는 다수의 소출력 전력소자를 병렬로 결합함으로써 원하는 고출력을 얻을 수 있다. 이와 같이 고출력 전력증폭기에 적용되는 전력결합기는 경로손실, 고주파수, 고출력에 따른 안정저항의 문제, 열방출 특성을 해결하기 위하여 본 논문에서는 변형된 Gysel 전력결합기를 적용한 결과 격리도(isolation)의 우수성을 제시하였으며, 최대출력 54dBm, 25%의 효율을 갖는 기상레이더용 X-band 250W 급 반도체형 전력증폭기를 설계하였다.

ABSTRACT

Necessity of compact X-band solid-state weather radar is required to provide weather data, which generate locally in a lot of Korea's mountainous area, rather than tube-type radar. Solid State Power Amplifier (SSPA) for using Dual-polarization method in weather radar is able to obtain desired high output by combining many low output power devices in parallel. Thus, Power combiner applying to high-output power amplifier has disadvantages such as path loss, ballast resistance problem by high frequency and high power, heat release. Therefore, In this paper we demonstrated the excellence of isolation, which is the result from modified Gysel power combiner. As a result, we designed X-band 250W solid state power amplifier with peak power 54dBm, 25% power efficiency for weather radar.

키워드

Radar, Gysel Power Combiner, SSPA, Isolation
레이더, Gysel 전력결합기, 반도체형 전력증폭기, 격리도

1. 서 론

기상/강우 레이더는 태풍 및 장마와 같은 광범위한 기상현상에 대한 탐지뿐만 아니라 집중호우, 우박, 강풍과 같은 강한 국지성 기후와 관련된 재해 위험을

감지하고 경보하는데 있어서도 매우 유용한 원격탐사 장비이다. 국내 기상예보는 S-band, C-band 에서 진공관 형태의 대형기상레이더 예보시스템으로 원거리 관측을 수행하고 있으나 곡률효과 및 산악지형이 많은 한국 실정에서 국지적으로 발생하는 기상현상에

* (주)한국통신부품(Korea Telecommunication Component) 부설연구소(lsr@kortcom.com)

** 교신저자(corresponding author) : 경남대학교 정보통신공학과(syncjin@naver.com)

접수일자 : 2014. 01. 15

심사(수정)일자 : 2014. 03. 10

게재확정일자 : 2014. 04. 11

대한 기상자료를 제공하여 위험기상의 감시, 도시 자연재해 예방 및 대형 레이더의 관측사각지대를 해소하기 위하여 소형의 X-band 기상레이더의 필요성이 요구되고 있다[1].

기상레이더에 사용되는 이중 편파레이더(Dual polarization radar)는 기존의 단일편파레이더에서 성능을 개선한 것으로, 수직과 수평 전자파를 주사하여 대기 중의 강수현상을 정확하게 탐지할 수 있는 원격관측 장비이다[2-3]. 전자파를 수평편파로 송수신하여 강수 구름의 위치 강우강도와 이동속도에 대한 정보를 얻는 일반기상레이더 기능에 추가적으로 수직편파를 동시에 송수신하여 비, 눈, 우박 등 강수형태 구분 및 비기상 에코(echo)의 정확한 탐지가 가능하고, 정량적 강수량 추정 및 예측에 관한 정보를 제공한다[4].

기상레이더의 전파 송신에 사용되는 고출력 반도체 증폭기는 GaAs, GaN과 반도체 소자를 이용하여 S-band 및 X-band에서 수백 와트(Watt)까지 반도체형 전력증폭기(SSPA)방식으로 사용된다[5-6]. 반도체 증폭기는 단일 소자의 출력이 높지 않으나 수십 볼트(Volt)V의 전압으로 동작이 가능하며, 높은 신뢰성을 가지는 SSPA는 다수의 소자를 병렬로 연결하여 전력 결합기로 결합함으로써 고출력을 얻을 수 있다. SSPA에 사용되는 동위상(in-phase) 전력결합기는 저 삽입손실, 높은 격리도(isolation) 특성 및 제작의 용이성, 열 방출 특성 등이 요구되며, 마이크로스트립 선로를 이용한 결합기로는 T-접합(T-junction) 전력결합기, 윌킨슨(Wilkinson) 전력결합기, Gysel 전력결합기가 주로 사용된다[7-8].

T-접합 전력결합기는 입/출력단의 특성 임피던스의 비로서 신호를 결합하는 방식으로 구조가 간단하나 출력 포트간 격리도 특성이 좋지 않아 아이솔레이터(isolator)를 추가로 삽입하여 격리도 특성을 개선할 필요가 있다. 하지만 아이솔레이터를 삽입하면 회로의 크기가 증가하고, 사용된 아이솔레이터의 내부손실과 아이솔레이터간의 위상편차로 인해 삽입손실이 증가하는 단점을 갖고 있다[9].

윌킨슨 전력결합기는 2개의 quarter-wave 전송선과 출력포트 사이에 안정저항(ballast resistor)을 삽입함으로써 출력포트간 격리도 특성이 우수하다. 그러나 고출력의 경우 저항에서 발생하는 열문제가 있으며, 고주파의 경우 출력포트간의 원치 않는 결합(cou-

pling)발생과 저항의 배치구조에 따른 제작의 어려움이 있다[10-11].

Gysel 전력결합기는 윌킨슨 전력결합기와 동일한 격리도 특성을 가지며, 밸리스트 저항이 접지(ground)에 연결되어 열 방출 특성이 우수해 고출력에 적용이 적합하다. 그러나 분기선로의 임피던스가 N-way의 경우 $\sqrt{N}Z_0$ 로 커져야 하는데, 이는 마이크로스트립선로로 제작 시 선로 폭이 감소하게 되므로 고출력에 적용 시 전력손실이 발생될 수 있다[12].

본 논문에서는 고주파수, 고출력에서의 전력결합기 단점을 보완하기 위하여 Gysel 전력결합기를 기반으로 마이크로스트립선로 폭을 감소시키지 않고 유지시키면서, 격리도 특성과 열 방출 특성을 유지 하도록 전력결합기에 개방 스테르브를 적용하여 스테르브의 길이에 따른 임피던스 변화로 격리도를 증진시키는 변형된 Gysel 전력결합기를 제안하고, 이를 이용하여 X-band 250W급 기상레이더용 SSPA의 특성을 제시하고자 한다.

II. Gysel 전력결합기 구조 분석

고출력 SSPA 설계 시 전력결합기는 결합되는 단위소자의 전력이 효과적으로 결합되고 작은 삽입손실을 가지도록 설계가 이루어 져야 한다. T-접합 전력결합기의 경우 모든 포트에서의 임피던스 정합이 불가능하다는 점과 포트간의 격리도 특성도 좋지 않아 T-접합 전력결합기를 적용하기 위해서는 추가적인 아이솔레이터를 필요로 한다.

T-접합 전력결합기와 윌킨슨 전력결합기를 고주파수, 고출력에 적용 시 공통적인 문제점은 전력결합기에 사용되는 안정저항(Ballast Resistor)에 있다. 주파수가 높아질수록 고출력의 전력을 견딜 수 있는 저항을 찾기 힘들 뿐만 아니라 고출력 전용 저항의 물리적 크기의 제한이 있어 윌킨슨 전력결합기의 적용이 힘들다.

이러한 문제점의 해결방안으로 Gysel 전력결합기가 있다. Gysel 전력결합기는 안정저항을 Ground에 직접 연결함으로써 고출력 신호의 결합에 적합한 구조를 갖고 있으며, 일반적인 구조는 그림 1과 같다. 설계 파라미터는 식(1), 식(2)와 같다.

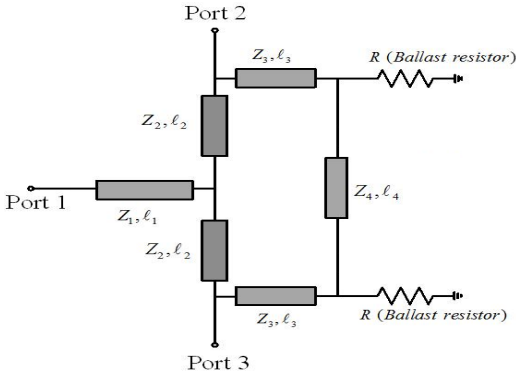


그림 1. 2-way Gysel 전력결합기 구조
Fig. 1 2-way Gysel power combiner structure

$$\begin{cases} Z_1 = Z_3 = R = Z_0 \\ Z_2 = \sqrt{2} Z_0 \\ Z_4 = Z_0 / \sqrt{2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} l_2 = l_3 = 90^\circ \\ l_4 = 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

그림 1에서 나타난 Gysel 전력결합기는 분기선로 Z_2 의 임피던스가 Z_0 보다 큰 값을 가지게 되므로 전송선로의 폭이 좁아져 고출력 적용에서 열손실을 발생 시키므로, 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 2와 같이 전송선로의 폭을 감소시키지 않고 격리특성을 유지하는 Gysel 전력결합기를 제안하였다.

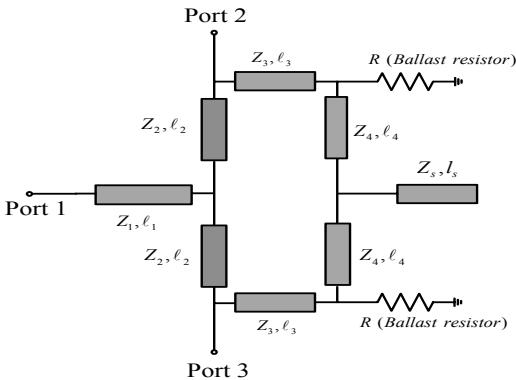


그림 2. 수정된 2-way Gysel 전력결합기 구조
Fig. 2 Modified 2-way Gysel power combiner structure

III. 변형된 Gysel 전력결합기를 이용한 SSPA 설계

그림 2에 나타난 마이크로스트립 선로의 임피던스 변화로 발생하는 열손실 문제를 해결하기 위해 제안한 Gysel 전력결합기는 Z_2 의 임피던스를 감소시켜 Z_0 로 조정 후, Z_1 은 윌킨슨 분기구조와 같이 Z_0/\sqrt{N} 값을 초기조건으로 선택하고 $Z_2 = Z_3 = R = 50\Omega$, $l_2 = l_3 = l_4 = \lambda_g/4$ 로 설정하였다. Z_1 의 임피던스와 Port1의 임피던스(Z_0) 차이로 인해 신호의 반사가 발생되므로 임피던스 정합을 위해 시뮬레이션을 통해 Z_1 과 l_1 을 결정하였다. 또한 개방 스테브(Z_s, l_s)의 추가를 통하여 스테브의 길이에 따라 결합단자간의 격리도가 최대로 되는 주파수를 조절 할 수 있게 하였다. 개방 스테브의 길이가 주어질 때 주파수 변화에 대한 격리도 특성 시뮬레이션 결과는 그림 3에 나타내었으며 개방 스테브 길이가 증가할수록 격리도 특성의 중심주파수가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

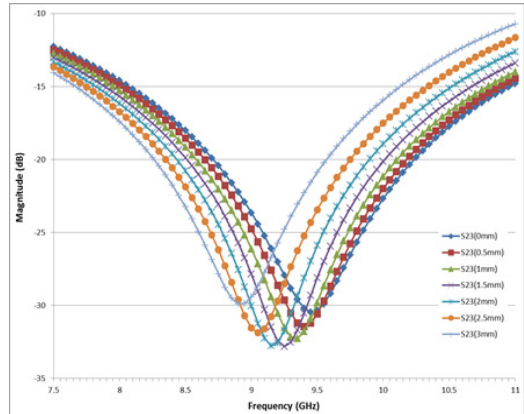


그림 3. 개방 스테브 길이에 따른 Gysel 전력결합기의 격리도 특성

Fig. 3 Isolation characteristic of Gysel power combiner by open stub length

유전체 매질 특성에 따른 허용 전력이 약 250W 이상 견딜 수 있도록 Taconic사의 $\epsilon_r = 2.5$ 의 기판을 사용하여 주전력증폭단에 사용될 4-way Gysel 전력결합기를 제작하였다. 그림 4는 제작된 4-way Gysel 전력결합기를 나타내며, 측정결과는 그림 5, 그림 6, 그림 7에 나타내었다.

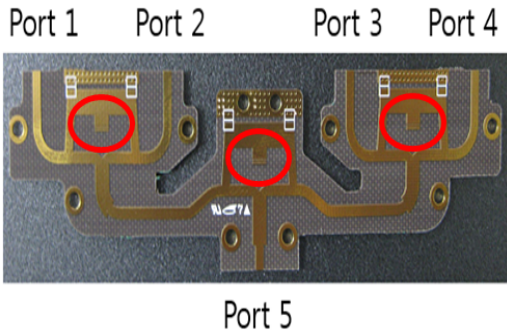


그림 4. 제작된 4-way Gysel 전력결합기
Fig. 4 Manufactured 4-way Gysel power combiner

4-way Gysel 전력결합기의 측정대역 내 삽입손실은 커넥터 손실(1 dB)이 포함된 7.6dB 이하로 측정되어 결합기 각 포트간에 동일한 전력이 전달됨을 확인하였다. 결합기 포트간의 격리도 특성은 25dB 이하의 특성을 나타내었다. 그림 6과 그림 7은 포트간 격리도 특성의 실제 측정과 시뮬레이션 결과 비교 데이터를 나타내고 있으며 제작 시 사용된 저항의 허용오차 (tolerance) 발생에 의해 격리도 특성 데이터의 차이가 발생하였으나 실제 SSPA 적용 시 허용오차가 낮은 저항의 사용으로 X-Band 250W SSPA에 적용 가능함을 확인하였다.

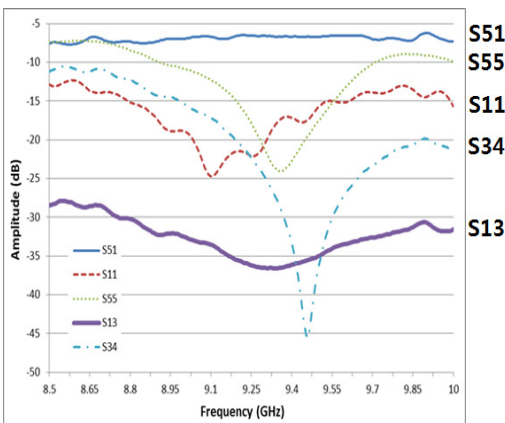


그림 5. 4-way Gysel 전력결합기 삽입손실, 반사계수, 격리도 측정결과
Fig. 5 Insertion loss, return loss, isolation measurement result of 4-way Gysel power combiner

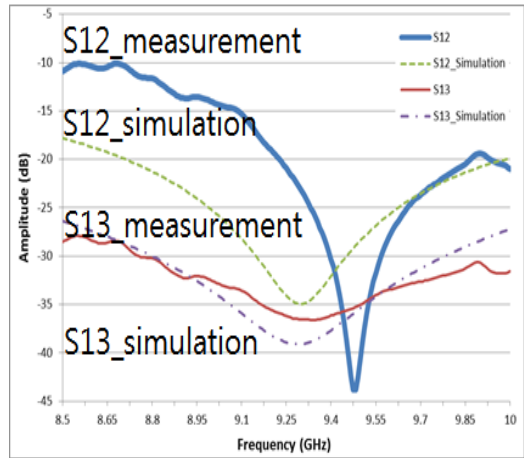


그림 6. 격리도 특성의 실측데이터와 시뮬레이션 데이터 비교(S12, S13)
Fig. 6 Comparison between measurement data and simulation data of isolation characteristic(S12, S13)

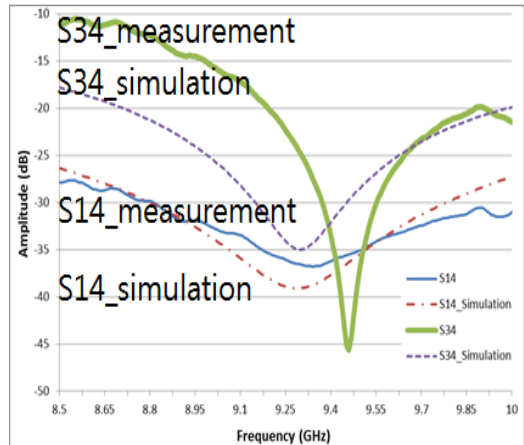


그림 7. 격리도 특성의 실측데이터와 시뮬레이션 데이터 비교(S14, S34)
Fig. 7 Comparison between measurement data and simulation data of isolation characteristic(S14, S34)

본 논문에서 구현한 X-Band 250W SSPA의 구성은 그림 8과 같이 전치증폭단, 구동증폭단, 주전력증폭단의 캐스케이드 결합방식으로 구성하였다. 각 증폭단의 소자에 안정적인 전원공급을 위한 순차 바이어스 회로가 추가로 들어간다.

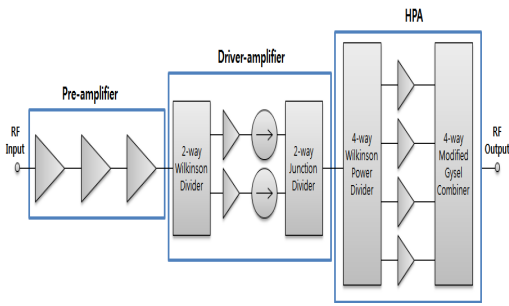


그림 8. 250W SSPA 구성도
Fig. 8 250W SSPA diagram

전치증폭단은 GaAs MMIC/FET를 캐스케이드로 연결하여 이득을 높이고, 구동증폭단과 주전력증폭단은 요구조건에 맞는 출력을 내기 위하여 충분한 이득과 전력을 얻을 수 있는 GaN HEMT를 병렬형태로 구성하였다. 구동증폭단은 2-way 윌킨슨 전력분배기, T-접합 결합기를 사용하였다. 250W 출력을 얻기 위한 전력증폭단은 4-way 윌킨슨 전력분배기 그리고 본 논문에서 제안한 4-way Gysel 전력결합기로 구현하였다. 내부구성을 모듈화하여 수리 및 확장이 용이하도록 하였으며, 캐스케이드로 구성하여 한 소자가 고장이 나더라도 단계적 성능저하로 인해 어느 정도의 낮은 출력으로도 구동이 계속될 수 있다.

각 증폭단(전치/구동/주전력 증폭단)설계 시 사용된 소자들은 입출력이 50Ω 로 내부정합 된 소자이다. 설계된 캐스케이드형 SSPA의 동작영역은 AB급으로 하였고, T-접합 결합기의 부족한 격리도 특성과 구동증폭기 소자의 보호와 동작 안정을 위해 아이솔레이터(isolator)를 배치하였다. 설계 시 주어진 능동소자의 최적 동작특성을 위해 이득의 튜닝과 P1dB 튜닝을 함께하였다.

전치증폭단은 구동증폭단을 구동하기 위한 증폭단으로 30W의 출력을 내고, 구동증폭단은 주전력증폭단을 구동하기위한 증폭단으로 2단 병렬구조를 적용하여 120W의 출력특성을 나타낸다. 주전력증폭단은 4개의 70W급 GaN 소자를 사용하여 최종 출력특성을 만족하도록 설계하였으며, 부득이한 고장에 대한 신뢰성 확보를 위해 병렬구조로 구성하였다.

본 논문에서는 주파수 범위 9.22GHz~9.52GHz, 듀티사이클 15%, 펄스주기 335 μ s, 펄스폭 50us인 펄스 조건에서 시험을 진행하였다. 그림 9는 250W급

SSPA의 피크출력전력(peak out power)과 효율(efficiency) 측정결과를 나타내었다. 대역 내 최대출력은 54dBm (250W)로 측정되었고, 효율은 25%로 측정되었다. 그림 10은 Gysel 전력결합기를 적용하여 제작된 SSPA를 보여주고 있다.

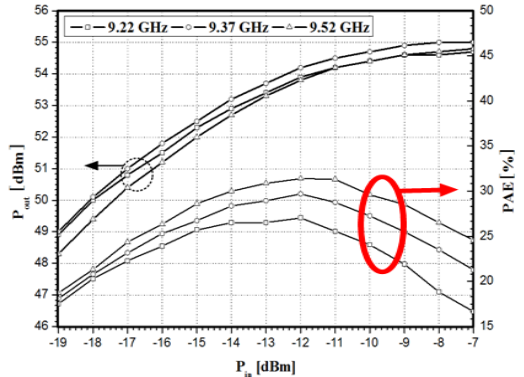


그림 9. 250W SSPA 측정결과
Fig. 9 Measurement result of 250W SSPA

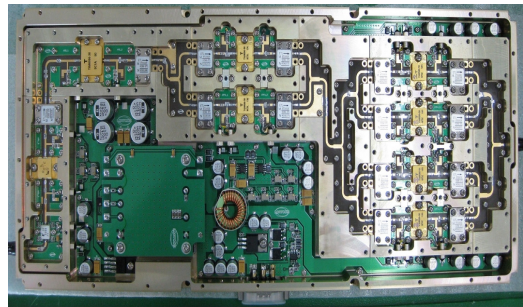


그림 10. 250W SSPA 측정결과
Fig. 10 Measurement result of 250W SSPA

IV. 결 론

본 논문에서는 SSPA설계에 적용되었던 T-접합 전력결합기, 윌킨슨 전력결합기의 문제점을 해결하고자 개방 스테르브를 적용하여 임피던스를 가변시킴으로써 격리도 특성을 높은 Gysel 전력결합기를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 Gysel 전력결합기는 선로 폭 변화에 따른 열손실문제를 해결하고자 윌킨슨 전력결합기의 분기구조를 적용하였고, 안정저항을 외부 접지로 연결함으로써 저항에 따른 열 문제를 해결 하였으

며, 추가적인 개방 스테르브를 적용하여 부족한 격리도 특성을 보완하였다. 변형된 Gysel 전력결합기를 적용하여 250W급 SSPA가 설계 가능함을 확인 하였으며, 이는 기상레이더용 X-band SSPA로 이용이 가능함을 보였다.

참고 문헌

[1] K. Sim, "X-band Dual polarization weather radar basic design and performance," *Mag. of the IEEK*, vol. 40, no. 2, 2013, pp. 29-56.

[2] D. Thompson, R. Kelley, M. Yearly, and J. Meier, "Direct Digital Synthesizer architecture in multichannel, dual-polarization weather radar transceiver modules," *2011 IEEE Radar Conf.*, May 2011, pp. 859-864.

[3] A. Ryzhkov, T. Schuur, V. Melnikov, P. Zhang, and M. Kumjian, "Weather applications of dual-polarization radars," *2011 IEEE Radar Conf.*, May 2011, pp. 1021-1025.

[4] D. Ryu, J. Kim, D. Kim, S. Kim, and J. Yang, "The Meteorological Agency dual polarization radar adoption and using plan," *Mag. of Korean Meteorological Society*, vol. 2013, no. 4, 2013, pp. 64-65.

[5] M. Kim, Y. Jang, and Y. Rhee, "An implementation of 60W X-band Cascade SSPA for Marine Radar System," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 1, 2012, pp. 1-7.

[6] N. Feng, F. Jianhong, F. Hao, W. Chaoyang, and L. Jianwei, "Design of an X-band High Power Solid State Power Amplifier Based on GaN HEMT," *2010 Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, May 2010, pp. 1916-1918.

[7] K. Datta, J. Roderick, and H. Hashemi, "A 22.4dBm Two-Way Wilkinson Power Combined Q-Band SiGe Class-E Power Amplifier with 23% Peak PAE," *2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. (CSICS)*, Oct. 2012.

[8] A. Abbosh and B. Henin, "Planar wideband inphase power divider/combiner using modified Gysel structure," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, July 2013, pp. 783-787.

[9] L. Chongzhe and D. Ricketts, "A low-loss, impedance matched $\lambda/4$ compact T-junction power combiner," *2012 7th European EuMIC*, Oct. 2012, pp. 147-150.

[10] O. Ahmed and A. Sebak, "A modified Wilkinson Power divider/combiner for ultrawideband communications," *2009 IEEE APSURSI.*, June. 2009.

[11] A. Wentzel, V. Subramanian, A. Sayed, and G. Boeck, "Novel Broadband Wilkinson Power Combiner," *2006 36th European Microwave Conf.*, Sept. 2006, pp. 212-215.

[12] H. Oraizi and A. Sharifi, "Design and optimization of a two-way Gysel power divider with arbitrary power division and impedance matching," *2009 Mediterranean Microwave Symp.*, Nov. 2009.

저자 소개

이상록(Sang-Rok Lee)



1996년 경남대학교 전자공학과(공학사)
 2011년 2월 금오공과대학교 전자 및 전기공학과(공학석사)
 2001년~현재 (주)한국통신부품
 2013년~현재 경남대학교 첨단공학과(박사과정)
 ※ 관심분야 : 마이크로파 능동소자 응용

임은재(Eun-Jae Lim)



2008년 경남대학교 정보통신공학과(공학사)
 2010년 경남대학교 정보통신공학과(공학석사)
 2012년~현재 경남대학교 첨단공학과(박사과정)
 ※ 관심분야 : 마이크로파 능동소자 응용, RFIC 설계



이영철(Young-Chul Rhee)

1981년~현재 경남대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심분야 : 고해상도 다기능 디지털 레이더 시스템, 마이크로파 능동소자 응용

