

광대역 공간 전력 합성을 위한 렌즈 증폭기에 관한 연구

A Study on the Lens Amplifier for Wideband Spatial Power Combining

권오선 · 권세웅* · 이병무** · 윤영중*

Ohsun Kwon · Sewoong Kwon* · Byoung Moo Lee** · Young Joong Yoon*

요 약

본 논문에서는 광대역 공간 전력 합성기에 적합한 새로운 구조의 광대역 렌즈 증폭기를 제안하였다. 제안된 렌즈 증폭기는 안정된 광대역 특성을 얻기 위하여 모든 소자를 평형 구조이면서 광대역 특성을 가지도록 설계하였다. 따라서 렌즈 증폭기의 입력부와 출력부 안테나는 팻 다이폴 안테나, 증폭부는 평형 증폭기, 빔 집중을 위한 지연 선로는 평형 구조의 CPS 선로를 각각 사용하였다. 제작된 5×5 이차원(2 dimensional) 렌즈 증폭기는 6 GHz에서 7.5 dB의 절대 이득, 37.4 dB의 EIPG, 그리고 19.6 %의 이득 대역폭을 얻었다. 기존의 렌즈 증폭기들에 비해 제안된 이차원 렌즈 증폭기는 중심 주파수 6 GHz 대역에서 넓은 3-dB 이득 대역폭을 제공하므로 C-band 무선 통신 시스템의 광대역 전력 합성기로 적합할 것으로 기대된다.

Abstract

In this paper, new wideband lens amplifiers are proposed for C-band wireless communication service. In order to obtain the wideband property, all components of the proposed lens amplifiers are designed with balanced structure and wideband characteristics. Fat dipole antenna as the input and output antenna, balanced amplifier as amplifying components, and coplanar stripline(CPS) as the delay line for the beam focusing are used for composing the stable wideband lens amplifier. The 5×5 2D lens amplifier has the characteristics that the absolute gain is 7.5 dB, the EIPG is 37.4 dB at 6 GHz, and the 3-dB gain bandwidth is 19.8 %.

Key words : Lens Amplifier, Wideband, Spatial Power Combining, Beam Focusing

I. 서 론

마이크로파 및 밀리미터파의 대역에서는 반도체 소자의 출력이 제한되는 단점을 가지므로, 출력 전력을 높이기 위한 다양한 전력 합성 기법이 연구되고 있다^{[1][2]}. 특히 능동 안테나를 자유 공간상에 두어 전력을 분배 및 합성하는 역할을 하는 준광학(quasi optical) 또는 공간(spatial) 전력 합성 기법은 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서 회로 손실이 적고 합성 소자수의 증가에도 일정한 합성 효율을 가지

므로 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다^{[3][4]}.

공간 전력 합성 기법 중에서 렌즈 증폭기는 기존의 렌즈 안테나가 가지는 광학적 원리를 이용하여 빔을 공간적으로 형성 또는 집중시켜 이득 및 효율을 증가시킨다^[2]. 대부분의 평면형 렌즈 증폭기는 마이크로스트립 구조의 능동 안테나를 기반으로 하여 소형, 경량, 집적화를 이루었지만, 현재의 무선 통신에서 요구하는 광대역 특성을 만족시키기는 어려우며 지금까지 제안된 대부분의 평면형 렌즈 증폭기는 좁은 임피던스 대역폭 특성을 가지는 안테

「본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2005-C1090-0502-0012).」
LG전자 정보통신사업본부(Telecommunication Equipment & Handset Company, LG Electronics)

*연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electric and Electronic Engineering, Yonsei University)

**삼성전자 정보통신총괄(Telecommunication Network Business, Samsung Electronics)

· 논문 번호 : 20060405-036

· 수정완료일자 : 2006년 5월 9일

나 또는 협대역의 이득 대역폭을 갖는 증폭기의 사용으로 인해 5% 안팎의 좁은 3-dB 이득 대역폭을 갖는다^{[5]~[7]}.

따라서 본 논문에서는 기존 공간 전력 합성기의 단점인 협대역 특성을 개선한 새로운 구조의 광대역 렌즈 증폭기를 제안한다. 본 논문에서 제안된 새로운 구조의 광대역 렌즈 증폭기는 새로운 구조의 광대역 다이폴 안테나를 방사 소자로 이용하여 구조에서 문제가 되는 능동 소자 방열 문제 해결과 입출력 포트간 격리도 향상을 얻을 수 있다. 광대역 이면서 저가의 렌즈 증폭기를 구현하기 위해 렌즈 증폭기의 모든 소자를 인쇄된 평면형 평형 구조로 설계하였으며, 각 소자들이 결합된 이차원 렌즈 증폭기를 제작 및 측정하여 제안된 렌즈 증폭기가 기존의 렌즈 증폭기들에 비해 양호한 이득과 훨씬 넓은 이득 대역폭을 가짐을 확인하였다.

II. 렌즈 증폭기 설계

본 논문에서 제안된 광대역 렌즈 증폭기의 구성과 측정 및 모의실험을 위한 구성은 그림 1과 같다. 입력 장치인 혼 안테나로부터 송신된 신호는 렌즈 증폭기의 입력 안테나에 입사되고 증폭기에서 증폭된 후 각 지연 선로에서 위상을 조절, 출력 안테나로 방사되어 수신 장치에 빔이 집중된다. 입출력 안테나는 렌즈 증폭기의 입출력단에서 전자기 결합을 막기 위해 수직·수평 편파 패트 다이폴 안테나를 각각 설계한다. 증폭기는 MMIC 모듈을 이용한 평형 증폭기로 설계하였으며, 지연 선로는 입출력 패트

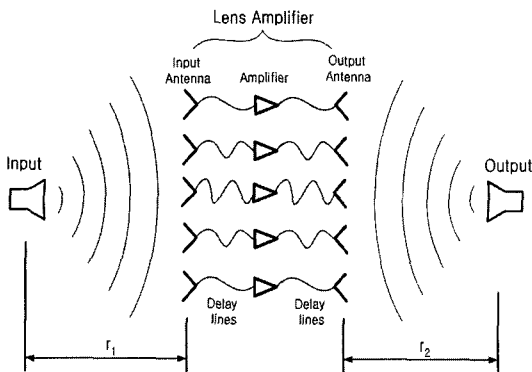


그림 1. 렌즈 증폭기의 구성
Fig. 1. Setup for the lens amplifier.

이폴 안테나와 평형 증폭기를 결합하기 위하여 평형 선로 구조의 CPS(Coplanar Stripline) 선로를 사용한다.

2-1 렌즈 증폭기 소자의 설계

설계된 렌즈 증폭기의 소자인 입출력 패트 다이폴 안테나, 평형 증폭기, 평형 지연 선로 설계 도면은 그림 2와 같으며 각 소자의 주요 설계 파라미터는 표 1에 나타내었다. 입출력 안테나는 높이 1.6 mm, $\epsilon_r=2.5$ 의 기판에, 평형 증폭기와 평형 지연 선로는 높이 1.6 mm, $\epsilon_r=4.5$ 의 기판위에 각각 설계되었다.

먼저 패트 다이폴 안테나는 렌즈 증폭기의 증폭부가 입출력 안테나의 커플링에 의한 발전을 막고 이득 측정시 송수신단간 직접 전송을 막기 위해 편파를 교차하여 설계되었다. 평면형 다이폴 안테나가 넓은 대역폭을 갖기 위해서는 안테나의 길이가 $\lambda/2$ 로 설계되어야 하고, 다이폴의 한 쪽 길이(L)와 폭(W)의 비가 0.9~1.1을 가져야 하며, 다이폴의 간격(G)은 대역폭과 평형 신호 급전 가능성을 고려하여

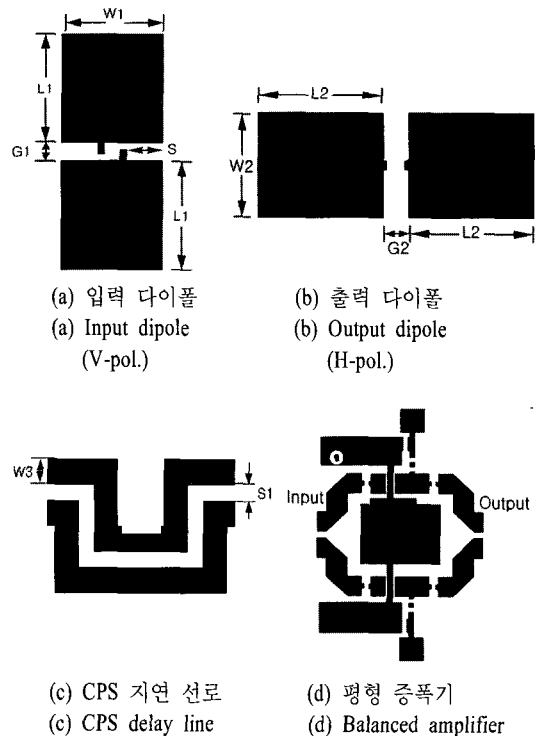


그림 2. 렌즈 증폭기 소자 설계 도면
Fig. 2. Layouts of the components of the lens amplifier.

표 1. 렌즈 증폭기 소자 설계 파라미터
Table 1. Design parameters of components.

파라미터	길이(mm)	파라미터	길이(mm)
W_1	8.5	W_2	9
L_1	12.03	L_2	11.73
G_1	2	G_2	2
S	3.05	W_3	1.5
S_1	0.8		

2 mm로 정하였다^{[8],[9]}. 안테나의 특성을 알아보기 위해 광대역 특성을 갖는 접지면이 테이퍼된 발룬을 결합하여 시뮬레이션 하였다^[10].

설계된 입출력 패드 다이폴 안테나의 반사 손실은 중심 주파수 6 GHz에서 22.3 %와 23.7 %의 넓은 임피던스 대역폭을 각각 나타내었다. 그림 2와 같은 CPS 선로의 임피던스 특성은 두 선로의 간격과 선로의 두께에 의해 좌우된다^[11]. CPS 선로의 간격과 두께를 결정하기 위해 시뮬레이터를 이용한 최적화 과정을 통하여 최적화된 값을 얻었다. 그림 2(d)와 같이 설계된 평형 증폭기도 마찬가지로 4~8 GHz 대역에서 10 dB 안팎의 평탄한 이득을 가지며 전 대역에서 $K > 1$, $|\Delta S| < 1$ 로 나타나 안정적인 증폭기로 동작하도록 설계되었다.

2-2 이차원 렌즈 증폭기 설계

그림 1과 같이 송수신기와 렌즈 증폭기가 일렬로 놓인 경우, 빔 집중을 위한 렌즈 증폭기의 각 지연선로 길이 W 는 로트만 렌즈의 경로 길이 증가식으로부터 유도되며 식 (1)과 같이 간단하게 나타내어진다^{[5],[12]}.

$$W = F + W_0 - [F^2 + r^2]^{1/2} \quad (1)$$

여기에서, F 는 초점 거리, W_0 는 임의의 중앙 지연선로 길이, r 은 렌즈 증폭기 중앙에서 각 안테나까지의 거리이다. 각 지연선로의 길이가 정해지면 앞서 설계된 모든 소자들을 결합하여 이차원 렌즈 증폭기의 설계가 가능하게 된다.

설계된 렌즈 증폭기(LA)를 지연선로가 결합되지 않은 안테나 배열 증폭기(AAA)와 비교 모의 실험하였다. 모의 실험은 3차원 전자기 시뮬레이터인

CST社의 MWS를 사용하였다. 렌즈 증폭기와 안테나 배열 증폭기의 비교 평가를 위해 수신 전력(P_r)과 교정 전력(P_c)의 비인 절대 이득을 사용하였으며 식 (2)로써 계산되어질 수 있다^[2].

$$AG = \frac{P_r}{P_c} = G_{in} G_a G_{out} \frac{(r_1 + r_2)^2}{r_1^2 r_2^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \quad (2)$$

여기에서 G_{in} 은 렌즈 증폭기 입력 안테나의 이득, G_a 는 증폭기의 이득, G_{out} 은 출력 안테나의 이득을 각각 의미하며 r_1 과 r_2 는 그림 1에서 송신기와 입력 안테나간의 거리, 수신기와 출력 안테나간의 거리를 각각 의미한다. 또한 송신기의 EIRP와 유사한 개념으로 증폭기의 출력 특성을 나타내는 유효 등방성 전력 이득(EIPG)를 통해서도 렌즈 증폭기의 이득 특성을 나타낼 수도 있으며 식 (3)과 같이 나타내어진다^[2].

$$EIPG = G_{in} G_a G_{out} = \frac{P_r}{P_c} \frac{r_1^2 r_2^2}{(r_1 + r_2)^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^{-2} \quad (3)$$

그림 3은 5x5 안테나 배열의 이차원 렌즈 증폭기와 안테나 배열 증폭기의 시뮬레이션 결과로써, 렌즈 증폭기는 12.2 dB, 안테나 배열 증폭기는 8.3 dB의 절대 이득을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과에 의하여 설계된 렌즈 증폭기가 동일한 조건의 안테나 배열 증폭기에 비해 약 4 dB 높은 이득을 가짐을 확인할 수 있다. 이득 대역폭 면에서도 렌즈 증폭기는 안테나 배열 증폭기에 비해 50 %가 향상된

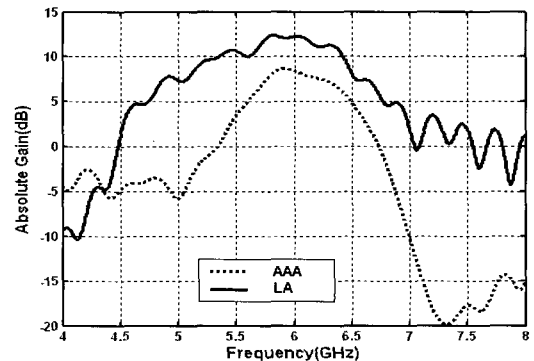


그림 3. 이차원 렌즈 증폭기의 절대 이득
Fig. 3. Simulated absolute gain of the 2D lens amplifier and antenna array amplifier.

다. 이것은 렌즈 증폭기의 빔 집중이 주파수에 따라 분산되더라도 그 위상 오차에 의한 이득 감소는 안테나 배열 증폭기에 비해 적게 영향을 주기 때문에 판단된다.

III. 실험 및 측정 결과

설계된 렌즈 증폭기의 소자 중 입출력 팻 다이폴 안테나, 평형 증폭기를 제작 측정하였으며 평형 지연 선로는 렌즈 증폭기의 빔 집중 특성을 통해 그 타당성을 검증하였다. 먼저 입출력 안테나인 수직 편파 · 수평 편파 팻 다이폴은 그림 4와 같이 각각 중심 주파수 6 GHz를 중심으로 21.5 % (5.25~6.54 GHz), 24 % (5.36~6.80 GHz)의 넓은 임피던스 대역폭을 가지며 시뮬레이션 결과와 유사한 경향을 보였다. 또한 두 안테나의 교차 편파 레벨은 각각 -26 dB와 -42 dB의 낮은 값을 가진다.

제작된 평형 증폭기의 S-파라미터는 그림 5에 나타나 있다. 시뮬레이션 결과에서 살펴본 바와 마찬가지로 전 테스트 주파수 대역에 걸쳐 2.5 dB 이하의 평탄도(flatness)를 가지며 중심 주파수 6 GHz에서 8.5 dB의 이득을 가진다. 또한 구해진 평형 증폭기의 S-파라미터들로부터 계산된 안정도 계수들은 각각 $K > 1$, $|\Delta| < 1$ 을 만족하여 제작된 평형 증폭기가 렌즈 증폭기의 증폭부로서 무조건 안정 조건 하에서 동작함을 확인할 수 있다.

제작된 렌즈 증폭기의 측정은, 송신기로 15 dBi의 이득을 갖는 피라미드형 혼과 수신기로 구형 도파관 형태의 WR-159 프로브를 사용하였으며 NSI사

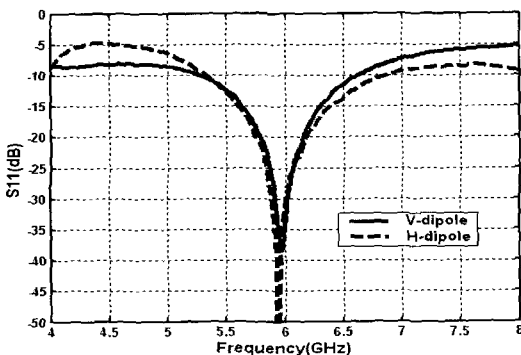


그림 4. 수직 · 수평 팻 다이폴의 반사 계수
Fig. 4. Return loss of the input and output antenna.

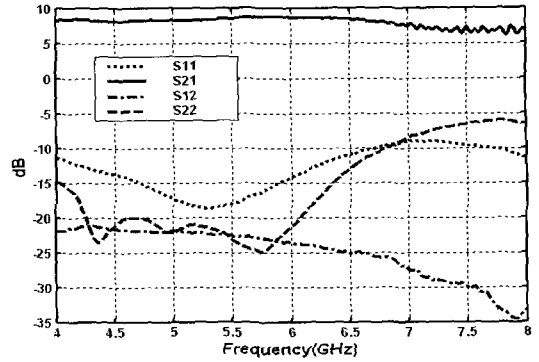
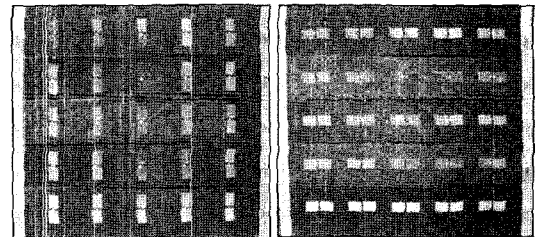


그림 5. 평형 증폭기의 S-파라미터
Fig. 5. S-parameters of the balanced amplifier.

의 근거리장 측정 시스템을 이용하여 초점거리($r_2 = 25$ cm)에서 이득과 필드 패턴을 측정하였다. 그림 6의 제작된 이차원 렌즈 증폭기는 5×5의 입력 수직 편파 안테나 배열, 평형 증폭기 배열, 출력 수평 편파 안테나 배열로 되며 전체 크기는 240(가로)×220(세로)×35.2(폭) mm³이다. 그림 6에서와 같이 입출



(a) 입력 수직 편파 팻 다이폴 안테나 배열
(b) 출력 수평 편파 팻 다이폴 안테나 배열
(a) Vertically polarized input fat dipole antenna array
(b) Horizontally polarized output fat dipole antenna array



(c) 평형 지연 선로와 평형 증폭기 배열
(c) Array of the amplifiers and delay lines

그림 6. 제작된 이차원 렌즈 증폭기의 구성
Fig. 6. The fabricated 2D lens amplifier.

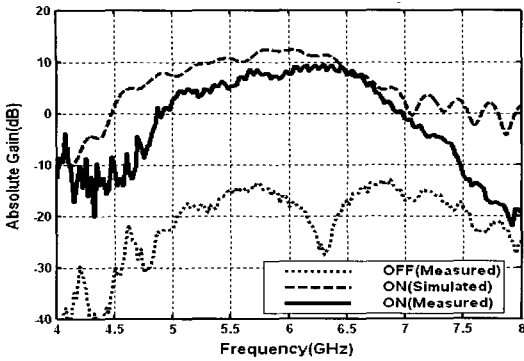


그림 7. 바이어스에 따른 렌즈 증폭기 이득
Fig. 7. Measured absolute gain of the 1D lens amplifier.

력 안테나 배열은 타일 형태, 평형 증폭기 배열은 서랍 형태로 각각 구성하였다. 서랍 형태의 평형 증폭기 배열로 인하여 공간 전력 합성기가 가지는 열 방출 문제를 감소시키며, 타일 형태의 안테나 배열은 증폭기 입출력 포트간 격리도 향상 및 안테나 공간 활용도를 높이는 장점을 결합한 구조이다^[2]. 그림 7은 제작된 이차원 렌즈 증폭기의 이득 측정 결과이다. 측정된 증폭기의 이득은 6 GHz에서 7.5 dB, EIPG는 37.4 dB, ON/OFF ratio는 26 dB, 3-dB 이득 대역폭은 1.18 GHz(19.6%)이다.

전체적인 경향은 시뮬레이션 결과와 유사하지만 이득이 시뮬레이션 결과에 비해 약 5 dB 낮은 값을 가진다. 이것은 시뮬레이션에서 고려하지 못한 평형 증폭기 배열과 안테나 배열간의 상호 결합과 제작상의 오차 등에 의한 것으로 판단된다.

그림 8은 초점 거리가 25 cm인 이차원 렌즈 증폭기의 필드 패턴을 측정한 것이다. 그림 8(a)는 수신 프로브와 렌즈 증폭기 출력 안테나간의 거리 $r_2=20$ cm일 때 필드 패턴이다. 중앙으로 큰 세기의 필드가 흩어져 있지만 아직 빔 집중이 이루어지지 않았으며, 그림 8(b)와 같이 렌즈 증폭기가 초점거리의 간격을 두고 삽입된 경우 필드 패턴이 중앙에 집중됨을 확인할 수 있다. 그림 8(c)는 $r_2=30$ cm로 초점거리를 넘어서는 경우, 필드 패턴의 빔 폭이 초점거리인 경우보다 넓어지므로 빔 집중이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 따라서 설계 제작된 렌즈 증폭기가 초점거리에서 가장 높은 이득과 좁은 빔 폭을

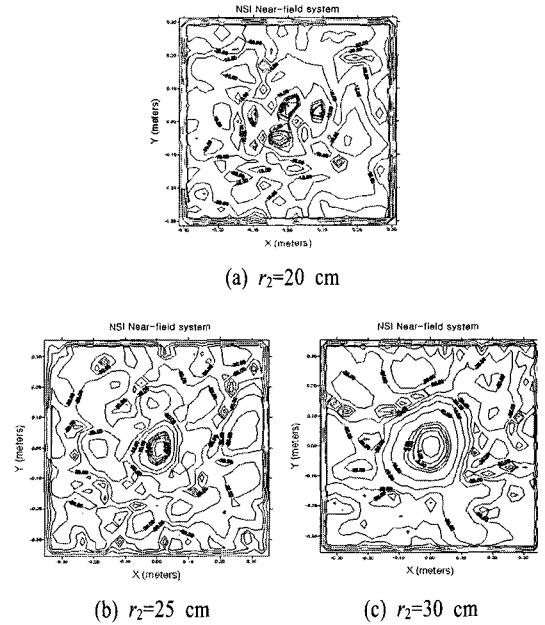


그림 8. 제작된 이차원 렌즈 증폭기의 필드 패턴
Fig. 8. Field pattern of the 2D lens amplifier.

가짐을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 C-band의 중심 주파수인 6 GHz 대역을 중심으로 광대역 렌즈 증폭기를 설계, 제작하여 그 특성을 고찰하였다. 제안된 렌즈 증폭기는 광대역 특성을 가지도록 입출력 안테나로 팻 다이폴 안테나를, 증폭부로 평형 증폭기를, 지연 선로로 CPS 선로를 사용하여 별도의 변환 장치없이 직접 결합하였다. 제작된 이차원 렌즈 증폭기는 평형 신호 선로 구조와 서랍형 증폭부 배열로 렌즈 증폭기의 안정성 향상을 꾀하였으며, 측정 결과 6 GHz에서 7.5 dB의 절대 이득, 37.4 dB의 EIPG, 19.6%의 이득 대역폭을 가진다. 따라서 제안된 이차원 렌즈 증폭기는 기존의 제안된 렌즈 증폭기들에 비해 양호한 이득과 EIPG를 가지며 훨씬 넓은 이득 대역폭을 가지므로 광대역 전력 합성기로 적용 가능하다.

향후에는 본 논문에서 제안한 렌즈 증폭기보다 높은 이득과 넓은 대역폭 구현을 위한 각 소자 설계 방법 및 빔 회전, 빔 기울임이 결합된 다양한 렌즈 증폭기 응용 방법에 대한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] M. P. DeLisio, R. A. York, "Trends in solid-state microwave and millimeter-wave technology", *IEEE MTT-S Newsletter*, pp. 11-15, 1990.
- [2] R. A. York, Z. B. Popovic, *Active and Quasi-optical Arrays for Solid-State Power Combining*, John Wiley & Sons, 1997.
- [3] M. Kim, J. J. Rosenberg, R. P. Smith, R. M. Weikle, J. B. Hacker, M. P. DeLisio, and D. B. Rutledge, "A grid amplifier", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 1, Issue 11, pp. 322-324, Nov. 1991.
- [4] S. Ortiz, A. Al-Zayed, and A. Mortazawi, "A Ka-band perpendicular-fed patch array for spatial power combining", *IEEE MTT-S International*, vol. 3, pp. 1519-1522, 2002.
- [5] Jon S. H. Schoenberg, Scott C. Bundy, and Zoya B. Popovic, "Two level power combining using a lens amplifier", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 42, pp. 2480-2485, Feb. 1994.
- [6] J. S. H. Schoenberg, T. Mader, B. Shaw, and Z. B. Popovic, "Quasi-optical antenna array amplifiers", *IEEE Int. Microwave Theory and Tech. Symp. Dig.*, pp. 605-609, 1995.
- [7] Zoya Popovic, Amir Mortazawi, "Quasi-optical transmit/receive front ends", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 11, pp. 1964-1975, Nov. 1998.
- [8] 이성호, "평면형 다이폴 안테나를 이용한 광대역 공간 전력 합성기에 관한 연구", 연세대학교 공학석사학위논문, 2002년.
- [9] Jeong Il Kim, Byung Moo Lee, and Young Joong Yoon, "Wideband printed dipole antenna for multiple wireless services", *RAWCON 2001, IEEE*, pp. 153-156, 2001.
- [10] 권오선, 김형락, 윤영중, "다중 무선서비스를 위한 평면형 초광대역 다이폴 안테나에 관한 연구", 한국통신학회, 하계종합학술발표회 논문초록집, 2003년.
- [11] Kai Chang, Inder Bahl, and Vijay Nair, *RF and Microwave Circuit and Component Design for Wireless Systems*, Wiley Inter-science, 2002.
- [12] D. T. Mcgrath, "Planar three-dimensional constrained lenses", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. AP-34, no. 1, pp. 47-50, Jan. 1986.

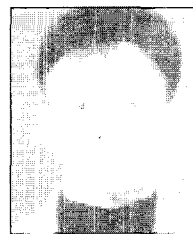
권 오 선



소자

1999년 2월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사)
 2004년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2004년 9월~현재: LG전자 정보통신사업본부
 [주 관심분야] 안테나, 마이크로파

권 세 응



소자, 전파전파

1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
 2002년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2002년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나, 마이크로파

이 병 무



1998년 2월: 순천향대학교 정보통신
공학과 (공학사)
2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터
공학과 (공학석사)
2005년 2월: 연세대학교 전기전자공
학과 (공학박사)
2005년 3월~현재: 삼성전자 TN총

괄 책임연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 초고출력 안테나 시스
템, RFID

윤 영 증



1981년: 연세대학교 전자공학과 (공
학사)
1986년: 연세대학교 전자공학과 (공
학석사)
1991년: Georgia Institute of Tech-
nology (공학박사)
1992년~1993년: 한국전자통신연구

원 위성통신기술연구단

1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파, EMI/EMC