

# CRLH 전송 선로 리키 웨이브 안테나를 이용한 평형 믹서

## Balanced Mixer Based on Composite Right/Left-Handed Transmission Line Leaky-Wave Antenna

김 영

Young Kim

요 약

본 논문은 차동과 공통 모드로 동작하는 메타 재질 구조를 바탕으로 평형 믹서 수신기를 제안한 것이다. 이 메타 재질 구조는 리키 웨이브 안테나로 동작하며, 순수 공통 모드는 억압한다. 이러한 특성은 낮은 LO 누설 전력과 높은 RF-LO 고립도를 갖고 있어 LO와 RF 경로에 추가적인 여파기가 필요로 하지 않는다. 이 메타 재질은 차동 모드 동작에서는 Composite Right/Left-Handed(CRLH) 메타 재질처럼 동작하고, 공통 모드에서는 차단되는 성질을 갖는 단위 셀을 기초로 설계하였다. 제안된 메타 재질의 차동과 공통 모드 특성은 실험 결과를 통하여 증명하였다. 메타 재질을 이용한 수신기는 1.96~2.40 GHz의 주파수 범위에서 동작하는 안테나와 평형 믹서를 집적화시켜 제작하였고, 2.4 GHz에서 21.1 dB의 믹서의 변환 손실을 얻었다.

### Abstract

This paper presents a novel balanced mixer receiver front-end design based on a metamaterial structure applicable to differential-/common-mode excitation. This metamaterial structure functions as a leaky-wave antenna and provides intrinsic common-mode suppression. Low LO leakage and high RF to LO isolation are achieved without additional filters for LO and RF paths. The metamaterial is based on a unit-cell which under a differential-mode excitation behaves like a composite right/left-handed(CRLH) metamaterial. In contrast, the metamaterial unit-cell is below cut-off under a common-mode excitation. Experimental results are used to verify the proposed metamaterial's differential-/common-mode characteristics. The metamaterial is integrated with a balanced mixer design resulting in an operation frequency range of 1.96~2.40 GHz with an optimum mixer conversion loss of 21.1 dB at 2.4 GHz.

Key words : Leaky-Wave Antenna, Composite Right/Left-Handed Transmission Line, Balanced Mixer, Differential-/Common-Mode

### I. 서 론

최근에 이동 통신 시스템은 큰 데이터 용량 전송, 복잡한 변복조 방법 그리고 광대역 대역폭을 요구하고 있다. 더욱이 이들 시스템은 대부분의 상용 분야에서 요구되는 간결한 평면 설계를 요구하고 있다. 능동 소자와 결합한 집적된 안테나는 현대 이동 통

신 시스템에서 컴팩트한 크기 요구를 만족하고 있으며 또한, 낮은 가격과 작은 전송 손실을 제공하고 있다. 결국 안테나와 능동 소자의 집적화는 가격과 크기를 줄이는데 기여하였다<sup>[1]~[3]</sup>.

이 논문은 작은 크기와 시스템 확장을 위해서 안테나를 집적화시킨 수신기를 위해서 메타 재질을 응용한 분야에 대한 것이다. 특별히, 차동/공통 모드로

「본 연구는 금오공과대학교 해외장기연수 프로그램에 의하여 연구된 논문임.」

금오공과대학교 전파통신과(Department of Radio Communication Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

· 논문 번호 : 20080506-057

· 수정완료일자 : 2008년 7월 16일

동작하는 메타 재료의 응용 분야를 제안할 것이다. 차동 모드일 때는, 메타 재료의 단위 셀은 평형 CRLH 단위 셀처럼 동작하며, 기본적인 백워드 웨이브는 단위 셀의 직렬 공진 주파수( $f_{se}$ )보다 낮은 쪽에서 동작한다. 그러나 공통 모드일 때는, 메타 재료의 단위 셀은 직렬 공진 주파수 아래에서는 차단된다. 평형 CRLH 단위 셀은 그것의 기본 모드가 fast 웨이브 영역에 있고, 브로드사이드 누설이 가능하기 때문에 사용한다<sup>[4]</sup>. 결과적으로 이 논문에서 제안한 메타 재료는 차동 모드에서 동작하는 후방에서 전방으로 스캐닝할 수 있는 리키 웨이브 안테나로 사용할 수 있다. 몇 개의 단위 셀을 직렬 연결하여 구성된 리키 웨이브 안테나는 수신기의 평형 믹서에 응용할 수 있는 직렬 공진 주파수 아래에서 공통 모드 여파기를 갖고 있다. 이때는 공통 모드 LO 신호를 제거하기 위해서 별도의 RF 여파기가 필요 없다. 더욱이, 리키 웨이브 안테나는 차동 모드에서만 동작하기 때문에 LO 영역의 여파기는 역시 필요가 없다. 이러한 성질은 공간과 소자를 줄일 수 있어 컴팩트한 수신기 설계에 적합하다.

차동/공통 모드 메타 재질을 기본으로 한 집적화한 안테나의 블록 다이어그램은 그림 1에 나타내었다.

## II. 메타 재료의 단위 셀 설계

여기서는 차동/공통 모드 메타 재료 단위 셀의 설계와 해석에 대해서 설명할 것이다. 메타 재료의 기본적인 CRLH 단위 셀을 기본으로 사용한 등가회로

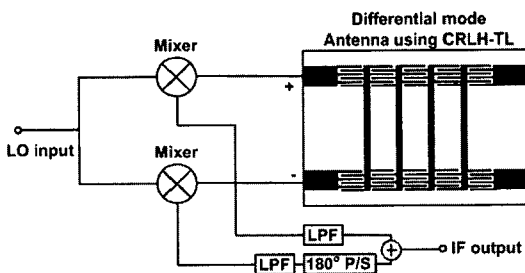


그림 1. 차동 모드로 야기되는 안테나와 결합된 평형 믹서를 바탕으로 한 집적화된 안테나의 블록 다이어그램

Fig. 1. Block diagram of proposed integrated antenna front-end based on balanced mixer with differential-mode excited antenna.

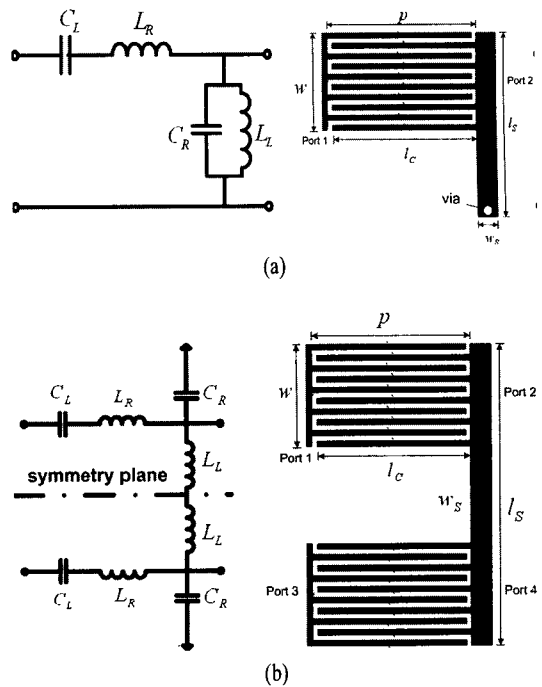


그림 2. (a) CRLH 단위 셀, (b) 차동/공통 모드 메타 재료 단위 셀의 등가 회로 모델과 마이크로 스트립 구현

Fig. 2. Equivalent circuit model and microstrip realization of (a) CRLH unit cell, (b) Differential/common-mode meta material unit cell.

와 마이크로스트립을 이용한 구현 회로는 그림 2(a)에 나타내었으며, 본 논문에서 사용된 셀은 차동 모드 여기에 의한 대칭 형태의 단위 셀로서 구현되어 있으며, 이것의 등가 회로와 마이크로스트립 구현은 그림 2(b)에 표현했다. 이와 같이 단위 셀 등가회로는 인터디지털 캐패시터를 직렬 캐패시터와 인덕터 그리고 병렬 캐패시터 결합으로, 또한 단락 스티브의 인덕터도 직렬 인덕터와 병렬 인덕터와 캐패시터가 결합된 등가 회로로 나타내어 파라미터를 추출할 수 있다.

회로의 관점에서, 그림 2(b)는 차동 모드로 동작할 때, 대칭면이 단락 회로로 동작하므로 병렬  $L_L$ 이 존재하고 결국 CRLH 단위 셀이 된다. 그러나 공통 모드 동작에서는 대칭면이 개방되어  $L_L$ 은 회로에 기여하지 못한다.

회로 모델을 구현하기 위해서 마이크로스트립 기술을 선택했으며, 직렬 캐패시터  $C_L$ 은 인터디지털 캐패시터로 구현했으며, 병렬 인덕터  $L_L$ 은 그림 2(b)

처럼 인터디지털 캐패시터에 높은 임피던스 선로를 연결함으로써 구현하였다. 더욱이 제안된 단위 셀은 병렬 인덕터를 구현하는데 비아를 사용하지 않았는데<sup>[5],[6]</sup>, 그 이유는 제작 과정의 편이성과 도체 손실을 줄이기 위함이다.

그림 2(b)의 단위 셀은 식 (1)의 평형 CRLH 조건을 만족하는 설계를 하였다.

$$f_{se} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_L L_R}}, f_{sh} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_R L_L}} \quad (1)$$

여기서  $f_{sh}$ 는 단위 셀의 병렬 공진 주파수이다. 평형 조건하에서 CRLH 단위 셀의 Bloch 임피던스는 주파수에 독립적이다.

여기서 사용된 소프트웨어는 Ansoft사의 Designer 3.5를 이용하여 EM 시뮬레이션을 통해서 단위 셀의 설계와 해석을 수행하였다.

그림 2(b)의 회로에서 구한 4 포트 S-파라미터를 이용하여 단위 셀의 차동/공통 모드 분산값의 결과를 이용하여 그림 3에 나타내었다.

그림 3의 결과는 차동 모드 동작 하에서 평형 CR-LH 구조는 2.40 GHz 이하 주파수에서는 후방 웨이브, 그리고 2.40 GHz 이상 주파수에서는 전방 웨이브를 지원한다. 또, 공통 모드 동작에서는 단지 2.4

GHz 이상 주파수에서 전방 웨이브만 지원되고, 2.40 GHz 이하 주파수에서는 차단됨을 보여준다.

위에서 설계된 평형 CRLH 단위 셀의 파라미터값은  $p=9.9$  mm,  $l_s=23.4$  mm,  $w_s=1.0$  mm,  $l_c=9.7$  mm,  $w=4.8$  mm 그리고 인터디지털의 5개 핑거 쌍은 0.3 mm의 폭과 0.2 mm의 간격을 갖는다. 또한, 추출한 S-파라미터로부터 파라미터 변환에 의해서 추출한 등가 회로의 소자 값은  $C_L=1.40$  pF,  $L_R=3.0$  nH,  $C_R=1.11$  pF 그리고  $L_L=3.88$  nH이다.

그림 3은 평형 메타 재질 단위 셀은 순수 공통 모드인 억압하고, 차동 모드 동작 시에는 1.96~2.40 GHz의 left-handed 영역에서 주요하게 동작하는 리키 웨이브 안테나로서 설명할 수 있다.

### III. 실험 결과

#### 3-1 차동 모드 CRLH 리키 웨이브 안테나

차동 모드로 동작하여 공통 모드를 억압하는 직렬 30개 단위 셀로 구성된 리키 웨이브 안테나는 2장에서 평형 구조의 단위 셀을 기본으로 구현하였다. 이 설계의 PCB 구조는 그림 4에 나타내었다. 안테나는 유전율  $\epsilon_r=2.2$ , 두께  $h=62$  mil인 로저스 RT/Duroid 5880으로 제작하였다.

4 포트의 리키 웨이브 안테나의 S-파라미터 특성을 확인하기 위해서는 안테나 양 끝에 경로가 180도 위상차가 존재하는 발문을 연결하여 차동 모드에서 동작하는 특성을 나타낸 것은 그림 5(a)이고, 공통 모드에서 동작하는 것은 안테나 양 끝에 윌킨슨 분배기를 연결하여 측정된 결과는 그림 5(b)에 나타내었다.

그림 5(a)에서, 차동 모드로 동작할 때 Left-handed (LH) 영역 즉 1.96~2.40 GHz에서, 리키 웨이브 안테나는 -3 dB의 손실을 가지면서 즉, 전파가 전파되면서 방사되는 것을 보여준다. 또한, 같은 주파수 영역에서  $S_{11}$ 은 -8 dB의 특성을 보이고 있어 안테나

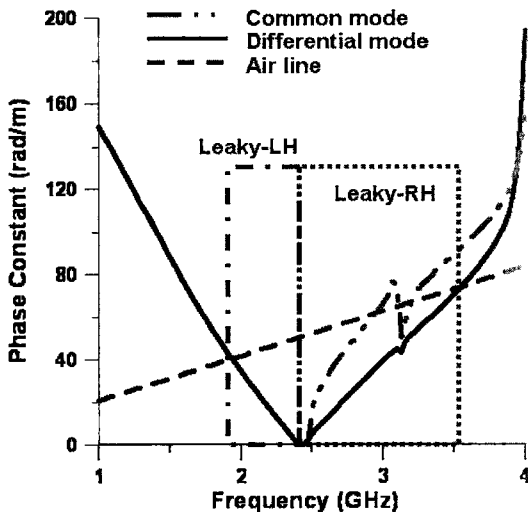


그림 3. 차동/공통 모드 여기에 의한 평형 단위 셀의 분산 다이어그램

Fig. 3. Dispersion diagram of balanced unit-cell calculated by MoM for differential-/common-mode excitation.

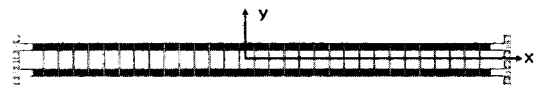
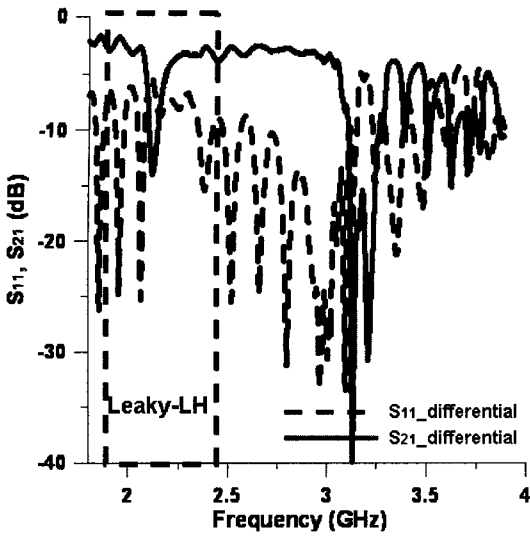
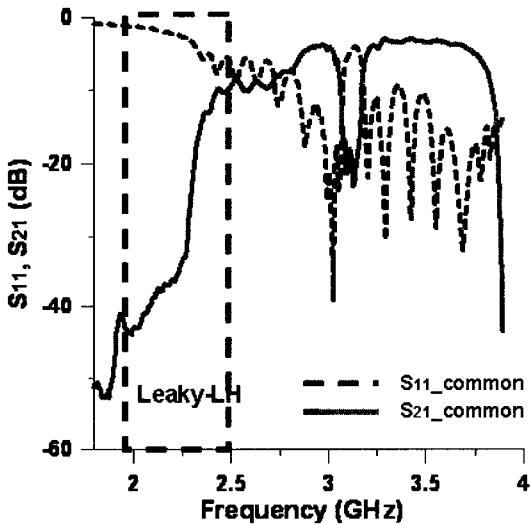


그림 4. 제작된 리키 웨이브 안테나의 PCB 구조  
Fig. 4. PCB layout of fabricated leaky-wave antenna.



(a) 차동 모드  
(a) Differential-mode excitation



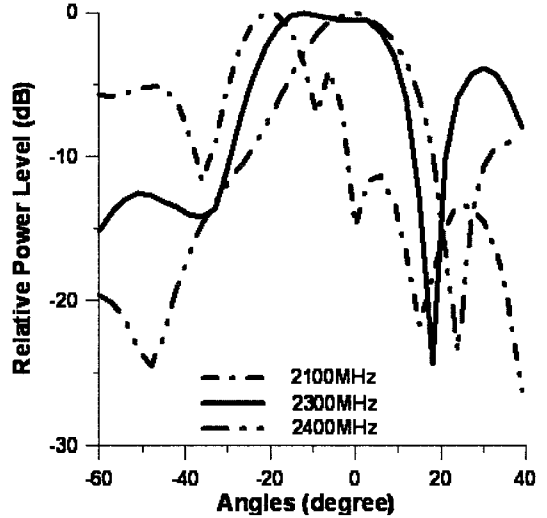
(b) 공통 모드  
(b) Common-mode excitation

그림 5. 30개 단위 셀을 갖은 리키 웨이브 안테나의 측정된 S-파라미터 값

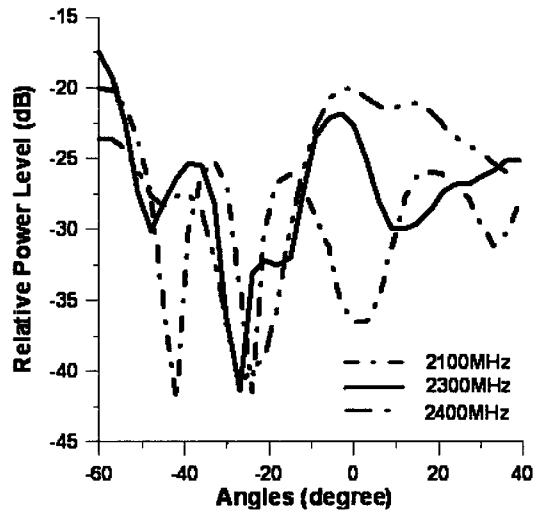
Fig. 5. Measured S-parameters of 30 unit-cell leaky-wave antenna.

의 반사 특성을 보여준다. 한편, 그림 5(b)에서는 공통 모드 동작 하에서  $S_{21}$ 과  $S_{11}$  특성은 각각  $-40$  dB와  $-3$  dB를 나타낸다. 이 결과는 차동 모드에서는 전파가 전달되고, 공통 모드 아래에서는 전파가 차단되는 것을 보여주는 것이다. 제안한 메타 재질 구조의 중요한 성질은 집적화한 안테나에 적용했을

때, LH 영역에서 공통 모드는 차단되고 차동 모드만 존재하는 것이다. 또, 그림 5(a)로부터 인터디지털 캐패시터의 자기 공진은 2.1 GHz 주변 또는 3.2 GHz 주파수 이상에서 발생되는데, 이러한 현상은 인터디지털 캐패시터의 핑거 끝을 상호 단락함으로써 해결



(a) 차동 모드 방사 패턴: y 방향의 극성  
(a) Differential-mode radiation pattern: polarization in y-direction



(b) 공통 모드 방사 패턴: x 방향의 극성  
(b) Leakage(common-mode) radiation pattern: polarization in x-direction

그림 6. x-z 평면에서 30개 단위 셀 리키 웨이브 안테나의 측정 방사 패턴

Fig. 6. Measured radiation patterns of 30 unit-cell leaky wave antenna in x-z plane.

할 수 있다<sup>7)</sup>.

리키 웨이브 안테나의 방사 특성은 그림 6에서 볼 수 있다.

2.10 GHz에서 2.40 GHz까지 주파수 범위에서 메인 빔은 주파수에 따라서  $-21^\circ$ 에서  $0^\circ$ 까지 변화함을 나타내었으며, 후방 웨이브는 차동 모드 여기로 동작하는 구조에 의해서 제공된다. 안테나 이득은 2.4 GHz에서 5.8 dBi를 얻었다. 반대로, 공통 모드로 동작할 때는, 방사 패턴은 메인 빔 영역의 20~40 dB 이하로 억압된다. 이 결과는 이 설계에서 목표로 하는 공통 모드 억압 특성을 보여주는 것이다.

### 3-2 집적화된 리키 웨이브 안테나와 평형 믹서

메타 재질 구조의 유일하고 장점을 가진 응용 분야를 보여주기 위해서, 리키 웨이브 안테나는 평형 믹서와 결합하였다. 이러한 집적화된 수신 회로의 사진은 그림 7에 나타내었다.

평형 믹서 회로는 유전율  $\epsilon_r=3.5$ , 두께  $h=20$  mil 인 Taconic사 테프론 기판으로 제작하였다. 또한, 믹서에 사용한 다이오드는 Avago사 HSMS-8202를 대칭적으로 사용하였다.

평형 믹서의 최적의 변환 손실은 21.1 dB로  $f_{RF}=2.4$  GHz 그리고  $f_{LO}=2.37$  GHz를 사용하여 IF 주파수가 30 MHz일 때의 값이다. 이때 믹서의 펌핑 LO 전

력은 10 dBm이다. 집적화된 안테나와 믹서 회로에서, LO 누설 전력은 높은 LO 전력을 요구하는 시스템에서 중요한 관심사이다. 이 LO 전력은 RF 포트에서 안테나로 방사되는 누설 전력이 작아지도록 하기 위해서 고립되어야 한다. 또한, 반대로 LO 신호는 입력되는 RF 전력으로부터 보호되어야 한다.

대부분의 많은 경우에서 LO와 RF 신호는 상대적으로 작은 주파수 간격에 의해서 분리되어 있기 때문에, 적당한 격리도를 확보하기 위한 LO와 RF 여파기를 구현하기 어렵다. 특히 광대역 리키 웨이브 안테나의 경우에는 이들 여파기는 전체 동작 영역을 가변할 수 있어야 격리도를 확보할 수 있다.

그러나 본 논문에서 제안한 설계에서는 리키 웨이브 안테나는 공통 모드 영역에서 차단되는 설계를 하였다. 안테나와 믹서가 결합된 집적 회로의 관점에서 보면, 차동 모드 안테나는 RF 신호를 다이오드에  $180^\circ$  위상차를 갖고 입력되고, LO 신호는 동 위상으로 입력되어 평형 믹서가 되는 것이다.

여기서 LO 신호는 동 위상으로 펌핑되므로, RF 포트에서 누설 전력은 공통 모드 동작으로 나타나게 되어, 결국 안테나의 고유 성질에 의해서 LO 신호의 방사가 억압된다. 믹서 단독으로 생각할 때, 어떠한 LO-RF 격리도는 두 신호 주파수의 근접성 때문에 존재하지 않는다. LO-RF의 격리도는 그림 6(b)에 나타난 것으로 차동 모드로 동작하는 안테나에서 공통 모드 LO 신호의 억압 정도를 나타낸 것이다. 결국 그림 6의 결과를 통해서, 제안된 집적화 회로는 추가적인 여파기 또는 발륜의 필요성을 제거하였으며, 시스템의 공간 축소와 복잡성을 줄인 효과를 가져왔음을 보여주었다.

이 구조는 수신되는 차동 모드 RF 신호는 LO 포트에서  $180^\circ$  위상으로 더해지기 때문에 LO 신호원을 보호하는 구조를 갖고 있다. 이것은 20 dB 이상 측정된 RF-LO 격리도를 얻는 것에 의해서 증명되었다.

마지막으로 IF 신호는 믹서의 위와 아래 경로에서 차동 모드로 나타나며, 그것은 저역 통과 여파기와 발륜을 통해서 결합된다. 저역 통과 여파기는 2단 체비체프 응답과 100 MHz의 차단 주파수를 갖고 있으며, 이것 때문에 LO-IF와 RF-IF 신호 격리도는 65 dB 이상 확보하였다.

완전한 집적화 시스템을 보이기 위해서, 그림 8은

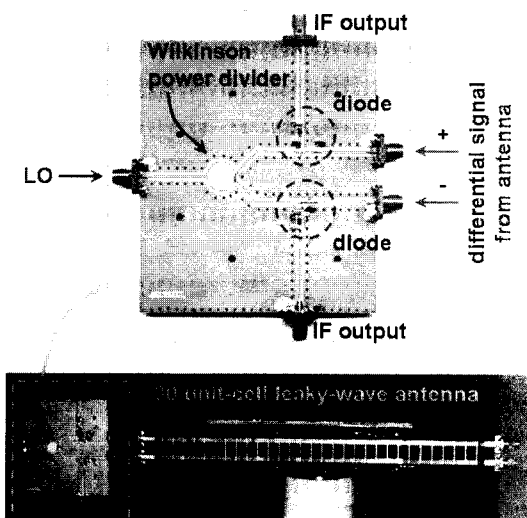


그림 7. 안테나와 결합된 집적화된 평형 믹서의 사진  
Fig. 7. Photograph of integrated balanced mixer with antenna.

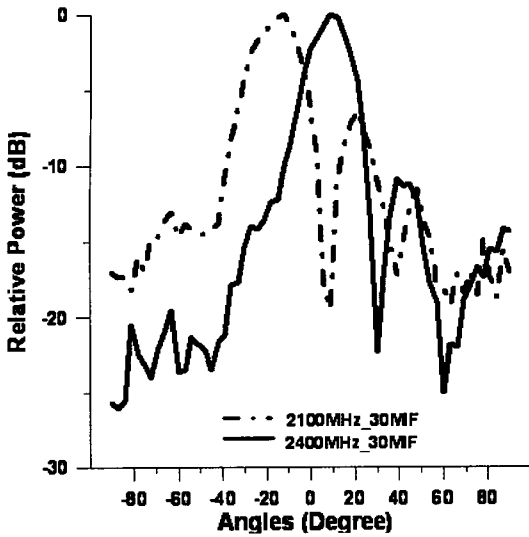


그림 8. 측정된 IF 수신 패턴(IF=30 MHz)  
Fig. 8. Measured IF received patterns(IF=30 MHz).

LO 신호로 2.07 GHz, 2.37 GHz, RF 신호는 2.1 GHz, 2.40 GHz를 각각 입력하였을 때 측정된 두 개의 측정된 IF 패턴을 나타낸 것으로 집적화된 시스템으로서 믹서가 동작을 보여주는 것이다. 결국, 평형 믹서와 차동 모드 CRLH 리키 웨이브안테나의 집적화에 의해서 몇몇 중요한 시스템 이익을 얻었다. 특히 이러한 접근은 LO와 RF 신호 여파기, 전체 시스템 크기 축소 그리고 추가적인 부품과 케이블에 의한 손실과 위상 에러를 제거하였다.

#### IV. 결 론

이 논문은 평형 믹서를 집적화한 평형 메타 재질 리키 웨이브 구조의 응용 예를 보여주었다. 대칭적 평형 CRLH 단위 셀은 차동 모드 여기에서 리키 웨이브 안테나로 동작하는 것을 보았고, 공통 모드에서는 차단되는 것을 볼 수 있었다. 이런 아이디어는 낮은 LO 누설 전력, LO 신호원 보호 그리고 여러 가지 여파기와 발륜을 제거하는 효과를 가지고 있다.

결국 이것은 시스템을 더욱 효율적이고 컴팩트하게 설계할 수 있게 만들었으며, 이러한 설계 개념은 차동 증폭기와 같은 집적 회로에 적용할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C. W. Pobanz, T. Itoh, "A microwave noncontact identification transponder using subharmonic interrogation", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 43, pp. 1673-1679, Jul. 1995.
- [2] V. D. Hwang, T. Itoh, "Quasi-optical HEMT and MESFET self-oscillation mixers", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 36, pp. 1701-1705, Dec. 1988.
- [3] Y. H. Chou, S. J. Chung, "A three-port 180-degree antenna hybrid: design and applications", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E-84-B, no. 9, Sep. 2001.
- [4] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials Transmission Line Theory and Microwave Applications*, New Jersey: J. Wiley & Sons, 2006.
- [5] R. Goto, H. Deguchi, and M. Tsuji, "Composite right/left-handed transmission lines based on conductor-backed coplanar strips for antenna application", *Proceedings of the 36<sup>th</sup> European Microwave Conference*, pp. 1040-1043, Sep. 2006.
- [6] T. Ueda, A. Lai, N. Michishita, and T. Itoh, "Leaky-wave antenna based on evanescent-mode left-handed transmission lines composed of a cut-off parallel-plate waveguide loaded with dielectric resonators", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E-90C, no. 9, pp. 1770-1775, Sep. 2007.
- [7] F. Casares-Miranda, P. Otero, E. Mrquez-Segura, and C. Camacho-Pealosa, "Wire bonded interdigital capacitor", *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 10, pp. 700-702, Oct. 2005.

김 영



1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

2002년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

1988년 1월~1993년 5월: 이즈텔시스템즈(주) 연구소 선임연구원

1993년 6월~1998년 2월: 삼성전자

(주) 정보통신사업본부 선임연구원

1998년 3월~2003년 2월: 두원공과대학 정보통신과 조교수

2003년 3월~현재: 금오공과대학교 전자공학부 조교수

[주 관심분야] RF 및 Microwave 회로 해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계