

측정기반 거동 모델을 이용한 IEEE 802.11a 무선랜용 LTCC Front-End 모듈 집적화 설계

준회원 한 아 름*, 정회원 윤 경 식*

Design of Integrated LTCC Front-End Module using Measurement-Based Behavioral Model for IEEE 802.11a WLAN Applications

Areum Han* *Associate Member*, Kyung-Sik Yoon*^o *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 IEEE802.11a 무선랜용 Front-End 집적화 초소형 모듈을 측정기반 거동 모델을 기반으로 한 behavioral-level 시뮬레이션을 수행하여 설계 제작 하였다. IEEE802.11a 무선랜 표준을 만족시키기 위해 54Mbps 전송속도의 64QAM 변조 방식 심볼을 1024개 전송하는 시스템을 구현하고 이 환경에서 ACPR과 EVM 시뮬레이션을 수행하여 비선형 특성을 확인하였다. 중심주파수 5.8GHz에서 30MHz, 20MHz와 11MHz 떨어진 ACPR의 우측 offset은 각각 49.36dBc, 36.90dBc와 24.58dB이고 좌측 Offset은 각각 50.14dBc, 34.04dBc와 28.85dBc이며 EVM은 2.94%이다. LTCC 공정을 사용하여 5층 기판으로 제작한 모듈의 크기는 13.4mm x 14.2mm이다. 송신단 특성은 P1dB가 16.2dBm, 전력이득은 16.73dB로, 수신단의 특성은 소신호 이득이 16.24dB, 잡음지수가 7.83dB로 측정되었다.

Key word : WLAN, Behavioral Model, FEM, Power Amplifier, LTCC

ABSTRACT

This paper describes the design and implementation of an integrated LTCC front-end module for the IEEE802.11a WLAN applications by performing the behavioral-level simulation using measurement-based behavioral model. To meet the IEEE802.11a WLAN standard, a system transmitting 1024 symbols through 64-QAM process at the rate of 54Mbps should be implemented and nonlinear properties are confirmed by simulations of ACPR and EVM in this circumstance. The right offsets of ACPR which are 30MHz, 20MHz, and 11MHz distant from the center frequency of 5.8GHz are 49.36dBc, 36.90dBc, and 24.58dBc, respectively. The left offsets are 50.14dBc, 30.04dBc, and 28.85dBc, respectively and EVM is 2.94%. The size of the module implemented with LTCC five-layer substrates is 13.44mm x 14.2mm. The measured characteristics of the transmitter show P1dB of 16.2dBm and power gain of 16.73dB. Those of the receiver exhibit the small signal gain of 16.24dB and noise figure of 7.83dB.

※ 본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(M10300000241-05J0000-24111) 지원에 의하여 수행되었으며 IDEC 및 CST KOREA의 설계도구 지원에 의하여 연구 되었음.

* 고려대학교 전자 및 정보공학부(ksyoon@korea.ac.kr), (°:교신처)

논문번호 : KICS2007-03-128, 접수일자 : 2007년 3월 20일, 최종논문접수일자 : 2007년 5월 14일

I. 서론

최근 무선랜(WLAN) 시스템은 급격하게 발전하고 있다. 특히 IEEE 802.11a 표준의 5GHz대역에 많은 관심이 집중되고 있다. 이 표준은 빠른 데이터 전송과 더불어 간섭과 주파수 효율이 이전의 시스템보다 우수하기 때문에 무선랜 사용자가 보다 많은 관심을 갖는 성능을 제공한다.^[1] 고속 데이터 전송을 위하여 IEEE 802.11a는 다중 반송파 변조 방식인 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) 방식을 채택하고 있다. OFDM의 기본 개념은 낮은 전송속도를 갖는 여러 개의 데이터를 다수의 부 반송파에 동시에 실어 전송하여 고속 데이터 전송을 구현하는 것이다. 이와 같은 방식은 한 심볼의 주기를 증가시키고 다중 채널 중첩과 심볼간의 간섭에 약한 단점을 보이며 이것을 방지하기 위해 OFDM 심볼에 보호 구간을 둔다.^[2] OFDM 시스템을 설계함에 있어 가장 어려운 점은 송신단의 최대치 전력과 평균 전력비, PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)가 매우 높다는 점이다.^{[2]-[3]} PAPR의 영향을 알 수 있는 ACPR (Adjacent Channel Power Ratio)과 EVM(Error Vector Magnitude)과 같은 성능지수를 통해 전체 송신 시스템의 규격을 결정하게 된다.^[4] 그러므로, IEEE802.11a 규격의 무선랜 시스템은 송신단 전력증폭기의 harmonic 특성과 선형성이 매우 중요하다.

그러나, circuit-level의 ACPR과 EVM 시뮬레이션은 수 시간의 시간이 소요되지만 거동모델을 이용한 behavioral-level 시스템 시뮬레이션은 그 시간을 효율적으로 단축시킬 수 있다.^[5] 또한, 전력증폭기의 대신호 모델이 제공되지 않은 경우에도 거동모델을 이용한 시뮬레이션은 전력증폭기의 비선형 특성 확인에 효과적이라 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 최근 동향인 SIP(System-In-Package)^{[6]-[8]}에 이용할 수 있는 IEEE802.11a 무선랜용 Front-End 집적화 모듈을 측정기반 거동모델을 생성하여 behavioral-level 시뮬레이션을 수행하여 설계하고 LTCC공정을 사용하여 제작하고자 한다.

II. 무선랜용 FEM 집적화 설계 및 제작

5.8GHz 대역의 무선랜 표준인 IEEE802.11a를 목표로 송수신용 RF FEM(Front-End Module)을 제작하기 위해 전력증폭기의 거동 모델을 이용하여 송신단 설계를 하였다. LTCC 공정 기술을 사용하여 구현하고자 하는 FEM 블록 다이어그램은 그림 1과 같다.

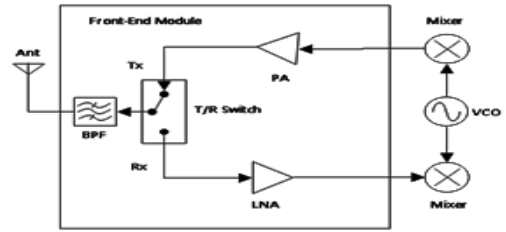


그림 1. IEEE 802.11a 시스템의 Front-End Module

FEM을 구성하는 각 블록 별 및 송 수신단 설계 목표는 54Mbps 전송속도를 갖는 IEEE 802.11a 표준^[2]을 만족할 수 있도록 표 1과 표 2와 같이 결정하였다.

2.1 전력증폭기 모듈 설계 및 제작

거동 모델을 이용한 behavioral-level 시뮬레이션을 하기 위해 패키지 된 F사에서 제작한 동작전압이 3.3V이고 중심주파수가 5.8GHz인 SiGe HBT MMIC 전력증폭기의 전력의존 S-파라미터를 측정하였다. 전력 의존 S-파라미터를 생성하기 위한 측정 시스템을 전력 측정기, 전원 공급기, 네트워크 분석기, PAD등으로 구성하였다. 전력증폭기 모듈 입력 전력을 -20dBm부터 7dBm까지 변화시켜 전력

표 1. IEEE 802.11a FEM 송신단 규격

		설계 규격	
중심주파수	5.8GHz		
전력증폭기	이득	19dB이상	
	P1dB	20dBm이상	
스위치	삽입손실	2.5dB이하	
	격리도	20dB이상	
대역통과필터	삽입손실	1.8dB이하	
	BW	100MHz	
송신단	선형출력전력	16dBm이상	
	30MHz offset ACPR	40dBc이상	
	EVM at 54Mbps	5.6%이하	

표 2. IEEE 802.11a FEM 수신단 규격

		설계 규격	
중심주파수	5.8GHz		
대역통과필터	삽입손실	1.8dB이하	
	BW	100MHz	
스위치	삽입손실	2.5dB이하	
	격리도	20dB이상	
저잡음증폭기	이득	16dB이상	
	잡음지수	2.3dB이하	
수신단	이득	12dB이상	
	잡음지수	8.61dB이하	

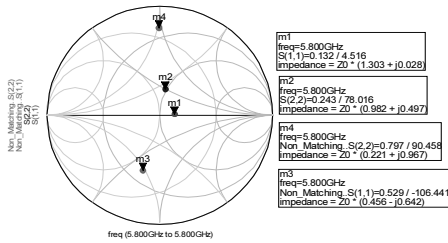


그림 2. 거동모델을 이용한 전력증폭기 입출력 정합과정

의존 S-파라미터를 애질런트 사 8753ES 네트워크 분석기로 측정하였으며, 동시에 애질런트 사 E4419B 전력 측정기로 입출력 전력도 측정하였다. 입출력단의 SMA 커넥터와 마이크로 스트립라인을 디임베딩한 MMIC 전력증폭기만의 전력의존 S-파라미터로부터 측정기반 거동 모델인 ADS의 p2d 파일을 생성하였다. MMIC 전력증폭기의 특성 향상을 위해 거동 모델을 사용하여 입출력 정합이나 전력 정합이 가능하다. 그림 2는 MMIC 전력증폭기의 거동 모델로 시뮬레이션 하여 얻은 S11(m3)과 S22(m4)를 이용하여 입출력 정합하여 얻은 S11(m1)과 S22(m2)를 보여준다. 거동 모델의 S11(m3)과 S22(m4)로부터 입력단에는 0.743nH의 인덕터를 병렬로 연결하여 입력 정합회로와 출력단에는 직렬 커패시터 1.157pF와 병렬 커패시터 0.687pF를 연결하여 전력 정합한 최적화된 회로를 구하였다.

이 최적화된 회로로 거동모델을 이용한 behavioral-level의 1-tone harmonic balance 시뮬레이션 결과는 그림 3과 같다. 정합된 MMIC 전력증폭기의 P1dB는 20.27dBm이고 전력이득은 20.92dB로, 정합된 전력증폭기의 시뮬레이션 결과(Δ, ○)는 정합 전의 결과(◇, ×)보다 P1dB는 4.57dB 전력이득은 4.05dB 향상되었음을 알 수 있다.

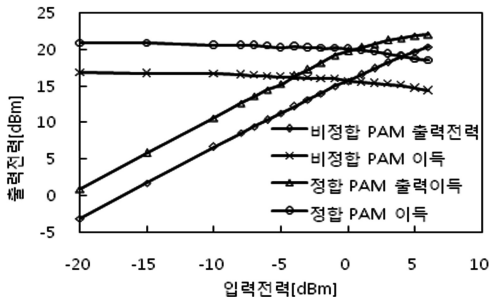


그림 3. 입력전력에 대한 전력이득 및 출력전력의 비교

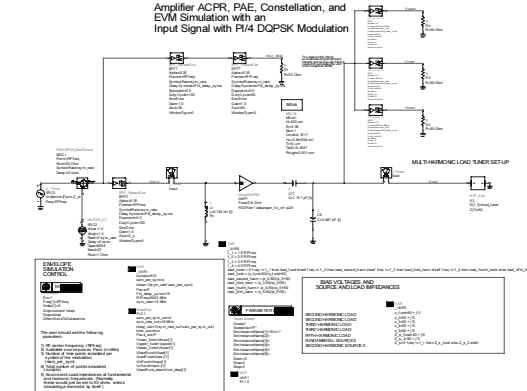


그림 4. behavioral-level ACPR과 EVM 시뮬레이션 회로

그림 4는 거동 모델을 사용하여 behavioral-level 시뮬레이션을 수행하기 위하여 설계한 회로도이다. 54Mbps 데이터 전송속도를 갖는 64 QAM 변복조 방식의 OFDM 송신 시스템을 구성하고 이의 시뮬레이션을 통해 IEEE802.11a 규격에 적합한지 확인할 수 있다. ACPR과 EVM의 시뮬레이션 실행 시간은 1GB RAM의 Pentium IV환경에서 각각 14.93초와 17.03초가 소요 되었다.

입출력 정합회로를 LTCC 공정기술로 구현한 SiGe HBT MMIC 전력증폭기 모듈의 1-tone 측정 결과(○, ×)와 측정기반의 거동 모델로 1-tone 시뮬레이션 결과(◇, □)를 그림 5에 비교하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 P1dB가 각각 20.5dBm과 21.33dBm이고 이득이 각각 20.5dB와 22.34dB로 측정결과와 시뮬레이션 결과가 일치함을 알 수 있다. 그림 6에서는 이 전력증폭기의 30MHz Offset ACPR의 측정결과(×)와 거동 모델 시뮬레이션 결과(○)를 비교한 바 1.98dB 이내로 일치함을 확인하였다.

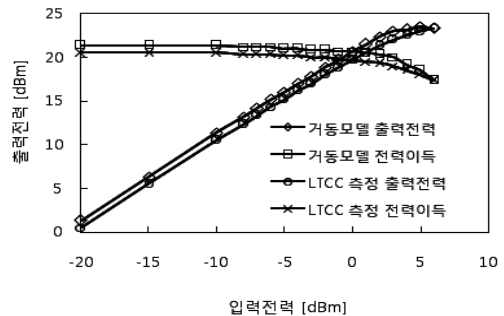


그림 5. 제작한 전력증폭기의 1-tone 측정결과와 거동모델 1-tone시뮬레이션 결과 비교

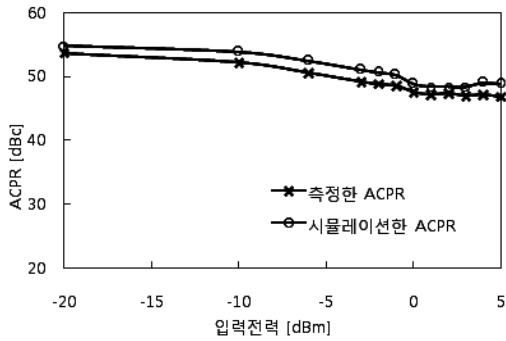


그림 6. 전력증폭기 30MHz offset ACPR 측정결과와 거동 모델 시뮬레이션결과 비교

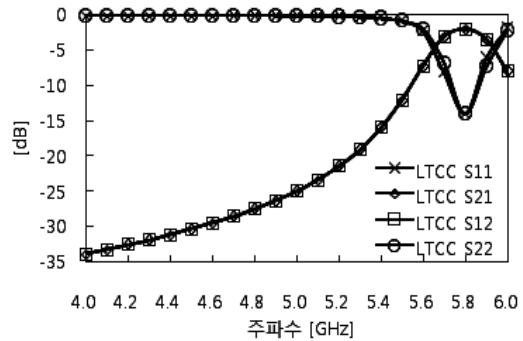


그림 8. LTCC 병렬결합선로 필터의 삽입손실과 반사손실 측정 결과

2.2 저잡음증폭기, 필터 및 스위치 모듈 제작

저잡음증폭기는 NEC사의 NE34018 FET를 사용하여 중심주파수 5.8GHz에서 이득이 16.3dB이고 잡음지수가 2.3dB가 되도록 LTCC 2~4층에 인덕터와 커패시터를 설계하여 임출력단을 수동 소자로 정합하고, 게이트-드레인 피드백 회로를 통해 안정도를 맞추었다. 측정된 저잡음증폭기 모듈의 소신호 이득(□)은 그림 7에서 보는 바와 같이 16.57dB이며 잡음지수(○)는 2.157dB이다.

대역통과필터는 중심주파수 5.8GHz에서 100MHz 대역과 삽입손실이 1.8dB이하가 되도록 LTCC 병렬결합선로 필터⁹⁾를 설계 하였다. 측정된 대역통과 필터의 특성은 그림8과 같이 중심주파수 5.8GHz에서 100MHz대역과 삽입손실(◇, □)이 1.87dB이고 반사손실(○, ×)이 22.85dB이다. 스위치 모듈은 F사에서 제공한 패키지 된 소자를 사용하여 설계하였다. 중심주파수 5.8GHz에서 송신 모드일 때 삽입손실이 1.875dB이고 격리도가 22.628dB이다. 또한, 수신 모드일 때 삽입손실이 2.305dB, 격리도는 20.009dB로 측정되었다.

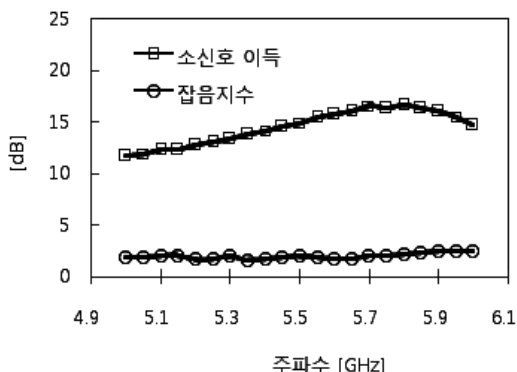


그림 7. 저잡음증폭기의 이득과 잡음지수 측정결과

Ⅲ. 무선랜용 집적화 모듈 제작 및 측정결과

그림 9는 전송 속도가 54Mbps인 IEEE 802.11a 표준의 1024개 심볼을 전송할 때, 거동 모델을 이용한 FEM의 behavioral-level ACPR과 EVM 시뮬레이션 결과로, +/-30MHz Offset ACPR이 49.36 dBc와 50.14dBc, +/-20MHz Offset ACPR이 36.9 dBc와 34.04dBc, +/-11MHz Offset ACPR이 24.58 dBc와 28.85dBc이고 EVM은 2.94%임을 확인하였다. ACPR과 EVM 시뮬레이션 결과는 IEEE802.11a 무선랜 표준 규격을 만족하였다. 또한, 출력 평균 전력이 3.818dBm이며 PAPR이 9.255dB이고 RF 단 입력전력이 -12.075dBm일 때 RF단 출력전력이 3.855 dBm으로 전력이득이 15.93dB임을 보여준다. 1GB RAM의 팬티엄IV 환경에서 대신히 모델을 이용한 circuit-level 시뮬레이션 시간은 257분 16초가 소요되었으나, 측정기반 거동모델을 이용한 behavioral-level 시뮬레이션 실행시간은 7분 23초가 소요되었다.

그림 10은 전송 속도가 54Mbps인 IEEE 802.11a 표준의 1024개 심볼을 전송할 때, FEM 입력전력을 -20dBm에서 6dBm까지 변화시켜 시뮬레이션 한

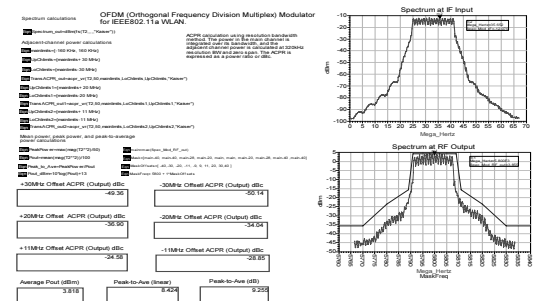


그림 9. 거동 모델을 이용한 behavioral-level ACPR과 EVM 시뮬레이션 결과

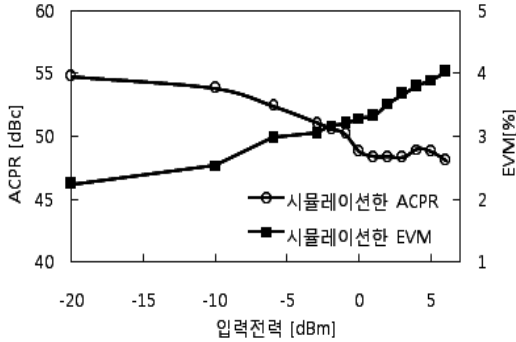


그림 10. 거동 모델을 이용한 behavioral-level EVM과 ACPR 시뮬레이션 결과

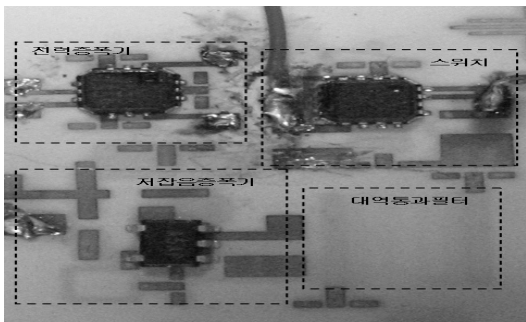


그림 11. LTCC 공정기술로 제작한 초소형의 5.8GHz 무선랜 FEM

EVM(■)과 ACPR(○) 결과이며 IEEE 802.11a 표준을 만족하는 것을 알 수 있다.

무선랜용 FEM을 LTCC 공정기술로 3차원으로 집적화하기 위하여 한국정보통신대학교(ICU)의 LTCC 라이브러리를 사용하여 정합 수동소자와 대역통과필터를 5층 기판 공정으로 구현하였다. 그리고 스위치, 저잡음증폭기, 전력증폭기는 패키지 된 소자를 최상층인 다섯 번째 기판 위에 임베드하여 전체 13.4mm x 14.2mm 크기의 초소형 모듈로 제작하였다. 그림 11은 LTCC 공정기술로 제작한 초소형의 5.8GHz 무선랜 FEM이다.

또한, IEEE 802.11a에 적용할 수 있는 FEM을 LTCC 공정기술로 제작한 송신단의 1-tone 측정결과와 거동 모델로 시스템 시뮬레이션 한 결과를 그림 12에 비교하였다. 이 그림 12에서 보는 바와 같이 P1dB가 각각 16.2dBm이고 16.7dBm이며, 전력이득은 각각 16.73dB이고 17.02dB임을 확인하였다. 이로부터 제작된 FEM 송신단의 1-tone 측정 결과(◇, □)와 거동 모델을 이용한 behavioral-level 시뮬레이션 결과(△, ×)가 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

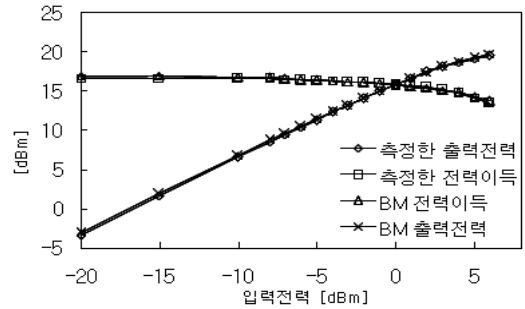


그림 12. FEM 송신단의 출력전력과 전력이득 결과 비교

표 3. LTCC FEM 송신단 설계규격과 측정결과 비교

		설계 규격	측정 결과
중심주파수		5.8GHz	5.8GHz
전력 증폭기	이득	19dB이상	20.5dB
	P1dB	20dBm이상	20.5dBm
스위치	삽입손실	2.5dB이하	1.875dB
	격리도	20dB이상	22.628dB
BPF	삽입손실	1.8dB이하	1.87dB
	BW	100MHz	100MHz
송신단	선형출력 전력	16dBm이상	16.2dBm
	30MHz offset ACPR	40dBc이상	46.16dBc

표 4. LTCC FEM 수신단 설계규격과 측정결과 비교

		설계 규격	측정 결과
중심주파수		5.8GHz	5.8GHz
BPF	삽입손실	1.8dB이하	1.87dB
	BW	100MHz	100MHz
스위치	삽입손실	2.5dB이하	2.305dB
	격리도	20dB이상	20.009dB
저잡음 증폭기	이득	16dB이상	19.85dB
	잡음지수	2.3dB이하	2.25dB
수신단	이득	12dB이상	16.24dB
	잡음지수	8.61dB이하	7.83dB

LTCC 공정기술로 제작한 FEM 수신단의 이득은 5.8GHz에서 16.24dB이고 잡음지수는 7.83dB으로 설계규격을 만족했다. 표 3에는 제작된 FEM 송신단의 설계규격과 측정 결과를 표 4에는 수신단의 설계규격과 측정 결과를 비교할 수 있도록 요약하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 전력 의존 측정 S-파라미터를 기반으로 거동 모델을 생성하고 MMIC 전력증폭기 입출력 정합을 통해 최적화 시뮬레이션을 수행하였

다. 최적화된 MMIC 전력증폭기의 ACPR과 EVM behavioral-level의 시뮬레이션 시간은 각각 1GB RAM의 Pentium IV 환경에서 14.95초와 17.03초가 소요되었다. 제작한 전력증폭기의 모듈 측정 결과는 P1dB가 20.5dBm, 전력이득이 20.5dB로, 시뮬레이션의 P1dB와 전력이득 결과와 일치하였다. 또한, 측정 ACPR결과와 시뮬레이션 ACPR결과 역시 일치하는 것을 통해 측정기반 거동모델을 사용한 behavioral-level 시뮬레이션이 전력증폭기 설계에 적용될 수 있음을 보여준다. 이를 근거로 IEEE802.11a 무선랜 FEM 모듈 설계에 측정기반 거동모델을 사용한 behavioral-level 시뮬레이션의 결과, ACPR과 EVM 시뮬레이션 시간은 기존의 circuit-level 시뮬레이션에 비하여 1/35정도 시간이 단축되었다. 따라서, 측정기반 거동모델을 이용한 behavioral-level 시뮬레이션은 ACPR 및 EVM과 같은 시스템 비선형 특성 시뮬레이션에서 매우 유용하며, 대신호 모델이 제공되지 않는 경우에도 설계를 할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, IEEE 802.11a 무선랜용 FEM을 측정기반 거동모델을 생성하여 behavioral-level 시뮬레이션을 통해 설계하였으며 LTCC 5층 기판으로 제작한 FEM 크기는 13.4mm x 14.2mm이다. 제작한 모듈의 송신단의 특성은 P1dB가 16.2dBm, 전력이득은 16.73dB로, 수신단의 특성은 소신호 이득이 16.24dB, 잡음지수가 7.83dB로 측정되었다.

본 논문에서 제작한 LTCC 공정을 사용한 집적화 FEM은 안테나, Mixer, VCO와 같은 MMIC 또는 패키지 된 칩을 최상위층에 결합시켜 SIP기술에 사용 할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 측정기반 거동모델을 생성하여 behavioral-level 시뮬레이션을 이용한 설계는 SIP 기술이 사용된 RF 시스템의 설계와 제작에서도 유용한 방법이라 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 무선 LAN 기술동향(HIPERLAN/2), 한국통신학회지, 17권 11호, pp. 1556~ 1581, 2000
- [2] IEEE Draft supplement to IEEE Std 802.11, "WirelessLAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications, High Speed Physical Layer in the 5GHz Band", 1999.
- [3] Richard van Nee, "OFDM for High Speed Wireless Networks", IEEE P 802.11- 97/123, Nov, 1997.
- [4] Agilent Technologies, "IEEE802.11 Wireless LAN PHY Layer(RF) Operation and Measurement: PN 1380-2"
- [5] J. C. Pedro, S. A. Maas, "A Comparative Overview of Microwave and Wireless Power-Amplifier Behavioral Modeling Approaches", IEEE Trans. on Microwave Theory & Tech., vol. MTT-53, issue 4, pp 1150-1163, Apr. 2005.
- [6] Lee, S. Chakraborty and S. Yoo, "Broadband highly integrated LTCC front-end module for IEEE 802.11a WLAN applications", Microwave Symposium Digest, 2002 IEEE MTT-S International, Volume: 2, pp. 1045-1048, 2002.
- [7] Lim Kyutae, A. Sutono, "A highly integrated transceiver module for 5.8 GHz OFDM communication system using multi-layer packaging technology", Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International, Volume: 3, pp. 1739-1742, 2001.
- [8] S. Pinel, S. Roellig, S. Mandal, "3D integrated LTCC module using μ BGA technology for compact C-band RF front-end module", Microwave Symposium Digest, 2002 IEEE MTT-S International, Volume: 3, pp. 1553-1556, 2002.
- [9] Areum Han and Kyung-Sik Yoon, "Design of Miniaturized Multi-Layer Vertical Coupled Line LTCC BPFs for WLAN Application", 한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집, pp. 247, 2005.

한 아 름 (Areum Han)

준회원



2003년 : 고려대학교 정보공학과
학사

2006년 : 고려대학교 전자.정보공
학과 석사수료

<관심분야> 초고주파회로 설계,
LTCC

윤 경 식 (Kyung-Sik Yoon)

정회원



1971년 : 서울대학교 공과대학 전
자공학 공학사

1977년 : Univ. Louis Pasteur de
Strasbourg D.E.A

1988년 : Univ. of Utah 전자공
학 박사

1978년~1982년 : 한국해양 연구
소 해양기기실 실장

1988년 9월~현재 : 고려대학교 전자 및 정보공학부 정
교수

<관심분야> 초고주파소자 모델링, 초고주파회로 설계