

2011년도 한국전자파학회(KIEES) 하계학술대회 및 워크숍 논문집

일 시 : 2011. 8. 18일 (목) ~ 8. 19 (금)

장 소 : 관동대학교 유니버스텔 회의실

주 최 : 사단법인 한국전자파학회

주 관 : 사단법인 한국전자파학회 강원지부

후 원 : 관동대학교 전자공학과 대학원,

하이테크, 리차드슨 RFPD, 누비콤, 플라소스

학술대회 발표 순서

좌장 : 박 웅 회 교수

1. 14:00 - 14:20
여파기 변환법을 이용한 이중대역 분배기 13
류재현, 김영 (금오공과대학교 전파통신과)
2. 14:20 - 14:40
마이너스 군지연 회로를 이용한 RF 전력증폭기 선형화 기법의 성능 개선에 관한 연구 15
최홍재, 문태수, 정용채 (전북대학교 전자정보공학부)
3. 14:40 - 15:00
Miniaturized LTCC Balun 19
Xin Guan, In-Ho Kang (한국해양대학교)
4. 15:00 - 15:20
무선마우스 구동용 무선전력전송 시스템 설계 22
정선화, 황희용 (강원대학교 전기전자공학과)

Coffee break 15:20 - 15:40

좌장 : 황 희 용 교수

5. 15:40 - 16:00
CRLH 전송선로를 이용한 평형 필터 25
김영, 윤정호 (금오공과대학교 전파통신과)
6. 16:00 - 16:20
다양한 개수의 공통 DGS를 이용한 전력 분배기 설계 27
이재훈, 이준, 임종식, 한상민, 안달 (순천향대학교)
7. 16:20 - 16:40
DMS를 갖는 변형된 전송선로 회로 모델의 특성 및 분석 30
Girdhari Chaudhary, Phirun Kim, 송호성, 정용채 (전북대학교 전자정보공학부)
8. 16:40 - 17:00
IQ-demodulator 동작 특성에 따른 신호 특성 분석 34
박웅희 (강원대학교 공학대학 전자공학과), 윤영철 (관동대학교 전자공학과)
9. 17:00 - 17:20
파장을 이용한 해충방제 38
최종운, 윤영철 (관동대학교 전자공학과)

마이너스 군지연 회로를 이용한 RF 전력증폭기 선형화 기법의 성능개선에 관한 연구

최홍재, 문태수, 정용채
전북대학교 전자정보공학부
(11010J@gmail.com)

1. 서론

일반적으로 널리 사용되는 RF 전력 증폭기의 선형화 기법으로 피드포워드, 피드백 구조를 들 수 있으며, 이 기법들은 원하는 오차 신호를 생성하는 신호 상쇄 루프를 포함하고 있다. 피드포워드 기법은 가장 뛰어난 선형화 대역폭과 선형성 개선 특성을 가지고 있음에도 불구하고 상대적으로 회로가 복잡해지고 효율이 감소한다는 단점을 가지고 있다^{[1][2]}. 특히 이러한 효율 저하에 있어서 주 전력 증폭기 (main power amplifier: MPA) 출력단에 존재하는 지연 선로의 삽입 손실이 큰 비중을 차지한다. 또 다른 선형화 방식으로 피드백을 들 수 있다. 그러나 오차 증폭기 (error power amplifier: EPA)를 포함한 피드백 루프에서 발생하는 군지연 시간 부정합 문제 때문에, 기껏해야 수 MHz의 상쇄 대역폭만을 얻는 치명적인 단점이 있다. 불운하게도, 군지연 정합에 관하여 발생하는 이 두 가지 문제점은 오랜 시간 동안 해결되지 못하고 있다. 그 이유는 이러한 문제점이 선형화 기법에 사용되는 소자들의 불완전성에 의해 발생하는 것이 아니라 선형화 기법 자체가 갖는 구조적인 문제점이기 때문이다. 특히, RF 피드백 기법은 실질적인 연구가 거의 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 시간 선행과 유사한 특성을 갖는 마이너스 군지연 회로 (negative group delay circuit: NGDC)를 신호 상쇄 루프에 도입함으로써 이러한 군지연 정합에 관한 문제를 해결하고자 하였다. 설계 및 실험 결과로써, 1) 피드포워드 기법에서 MPA 출력단에 존재하는 지연 선로의 제거를 통해 효율을 증대시켰으며, 2) 피드백 구조에서 완벽한 군지연 정합 조건을 만족시킴으로써 대역폭을 확장할 수 있음을 보였다.

2. 본론

가. 마이너스 군지연 회로

피드포워드 증폭기의 EPA 경로의 군지연 시간을 감

소시키기 위하여 -9 ns의 군지연, 0.2 dB의 삽입손실, 그리고 WCDMA 하향 주파수 대역의 중심주파수에서 30 MHz의 대역폭 (2.125 ~ 2.155 GHz)을 갖는 2단 반사형 NGDC를 설계하였다. 설계된 회로는 그림 1에 나타난 것과 같이 90° 하이브리드와 각각 중심주파수가 2.125 GHz와 2.155 GHz인 두 개의 단위 분산소자 NGDC (#1과 #2)로 구성되어 있다. 분산소자 NGDC의 손실 성분은 그림 3에 표현된 것과 같이 이득이 G 인 범용 소신호 증폭기를 이용하여 보상하였다. 각 소신호 증폭기 모듈은 Mini-Circuits사의 2단 ERA-5SM으로 구성되어 있으며, 전체 2단 NGDC의 총 전력 소모는 2 W이다. 이 전력소모는 MPA 출력단에 위치한 군지연 소자에서의 전력 소모에 비해 매우 작은 값이다.

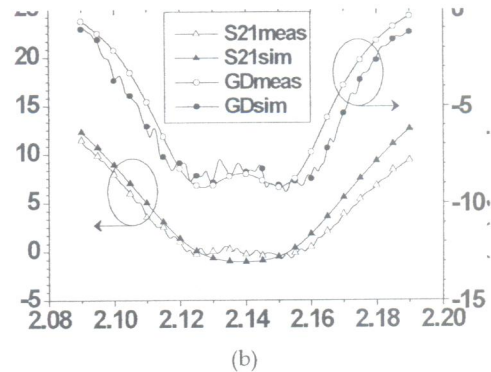
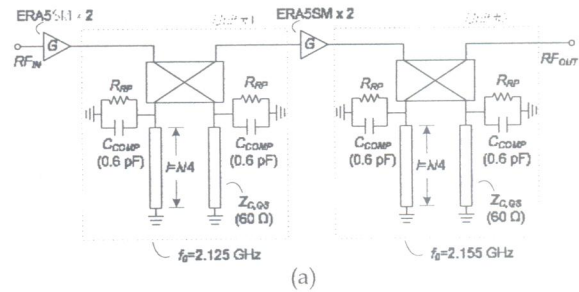


그림 1. (a) 2단 NGDC 회로도, (b) 시뮬레이션 결과

나. 피드포워드 선형화 기법의 효율 개선

그림 2는 본 연구에서 제안하는 NGDC를 적용한 피드포워드 증폭기의 두 가지 구조이다. 그림 2에서는 NGDC가 주신호 상쇄루프와 혼변조 왜곡 신호 상쇄 루프의 공통경로에 삽입되었으며, 그로 인하여 EPA, 가변 감쇄/위상 조절기, 그리고 또 다른 결합 소자들에 의한 군지연 시간을 보상해주므로 MPA 출력단에 군지연 소자를 사용하지 않아도 된다. 이 때, MPA 출력단의 지연 선로에 의한 삽입 손실이 없어져서 전체 시스템의 효율을 증가시켜주며, 주신호 상쇄 기능은 영향을 받지 않는다. 그로 인하여 MPA의 군지연 소자(DELAY 1)와 혼변조 왜곡 신호 상쇄 루프(DELAY 2)의 군지연 소자를 동시에 감소시킬 수 있다. 만약 MPA와 EPA 경로의 군지연 시간이 동일할 경우, 전체 시스템에서 지연 소자들을 완전히 제거 가능하여 피드포워드 시스템의 효율을 증대시키면서 전체 크기를 줄일 수 있을 것이다.

일반적으로 군지연 소자는 작은 삽입 손실을 갖도록 직경이 큰 고출력 동축 선로 또는 부피가 큰 군지연 여파기로 구현되어 시스템 크기를 줄이는데 제약 사항으로 작용하지만, NGDC와 손실 보상 회로는 90° 하이브리드, 전송선로와 소신호 증폭기로 이루어져서 EPA 구현 시에 함께 집적화가 가능하다. 그로 인하여 고가의 군지연 여파기 또는 고출력 케이블을 제거함으로써 시스템 크기 감소와 제작 단가의 인하가 가능하다.

그림 3은 2-carrier WCDMA를 입력하여 43 dBm의 출력력을 얻을 때 제안된 피드포워드 증폭기의 선형화 동작 유무에 따른 스펙트럼을 나타내고 있다. 5 MHz 이격된 주파수에서 측정했을 때, 선형화 동작을 시키지 않았을 때 인접채널 누설 전력비는 -36.3 dBc 이었으나 선형화 동작을 시켰을 때 -56.6 dBc 로 20.3 dB의 개선 효과를 얻을 수 있었다.

제작된 피드포워드 증폭기의 측정 성능 요약 및 기존 피드포워드 증폭기와의 성능 비교가 표 1에 요약되어

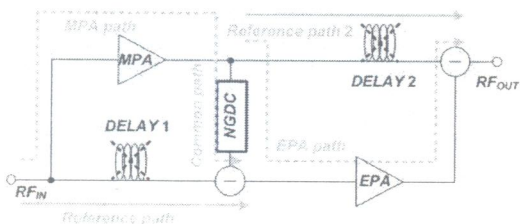


그림 2. 지연 선로가 제거된 피드포워드 증폭기.

있다. 2-tone 신호를 증폭시키는 피드포워드 증폭기는 신호의 첨두 대비 평균 전력비 (peak to average power ratio: PAPR)가 상대적으로 작기 때문에 증폭기를 포화 레벨 근처에서 동작시킬 수 있으며, 따라서 상대적으로 높은 효율을 얻기에 용이하다. 그러나 높은 PAPR을 갖는 광대역 변조 신호는 상대적으로 전력증폭기를 back-off 한 영역에서 동작을 시켜야 하며 그로 인하여 효율이 급격히 저하된다. 본 연구에서 얻은 결과인 19.5 %의 드레인 효율 (또는 19.4 %의 PAE)은 기존 연구 중에서 가장 높은 효율인 것으로 조사되었다.

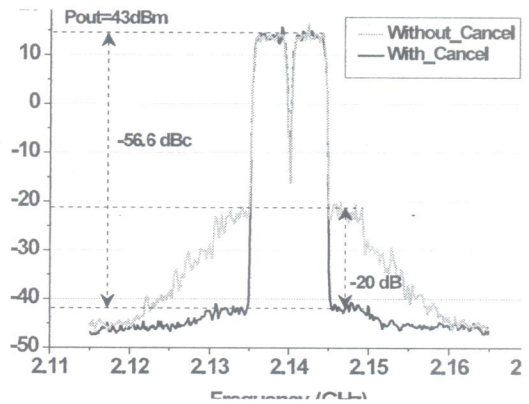


그림 3. 선형화 전/후의 2-carrier WCDMA 스펙트럼.

표 1. 이전 연구 결과와 성능 비교

	Frequency (GHz)	Pout (dBm)	Test Signal	Signal BW (MHz)	Linearity (dBc)	Drain Efficiency (%)
[6]	1.97	46.6	CDMA	3.75	-52	7
[7]	0.56	41	2-tone	2	-65	12
[8]	2.14	46.5	WCDMA	10	-55	13.6
[9]	2.14	26	2-tone	-	-	12
[10]	0.22	40	2-tone	0.05	-35	27
[11]	0.22	40	2-tone	0.05	-32	33
[12]	2.12	45.6	WCDMA	-	< -50	10
This work	2.14	44	WCDMA	10	-53	19.5

다. 피드백 선형화 기법의 대역폭 개선

그림 4 (a)는 계산을 통하여 얻어진 군지연 부정합에 따른 20 dB 상쇄 유효 대역폭 변화를 나타내고 있다. 0.3 ns의 군지연 부정합이 있을 경우, 20 dB 상쇄 유효 대역폭은 약 5.2 %에 해당되며, 만약 군지연 정합이 1.0 ns로 증가되면 20 dB 상쇄 유효 대역폭은 1.6 %로 급격하게 감소된다. 피드백 선형화 기법의 경우, 이 피드백 루프의 군지연 정합이 구조적으로 불가능하기 때문에 기존의 연구 결과들은 대개 수백 kHz의 대역폭을 갖는 신호에 대해서만 연구가 이루어져 왔으며, 상쇄 효과도 매우 미미하였다.

그림 4 (b)는 마이너스 군지연 회로를 적용한 피드백 선형화 증폭기의 회로도를 보이고 있다. 이 회로는 MPA, EPA, 입력 결합기, 왜곡 신호 삽입 결합기, 출력 신호 추출 결합기, 대역 통과 여파기 (bandpass filter: BPF), 그리고 NGDC로 구성된다. 크기 및 위상 조절 장치 외 부가 회로들은 생략되어 있다. 우선 입력 신호 (RF_{IN})의 일부가 MPA에 인가되고 증폭기의 이득만큼 증폭된다. 나머지 입력 신호는 증폭된 출력 신호와 비교되는 기준 신호로서 사용된다. 잡음 또는 증폭기의 비선형 왜곡 성분을 포함하고 있는 출력 신호와 기준 신호 사이의 차이가 오차신호가 된다. 오차 신호는 EPA에서 증폭이 되고 출력 신호에 포함된 비선형 성분만을 감소시킬 수 있도록 MPA의 입력단에 인가된다. MPA, 출력 신호 추출 결합기, 대역 통과 여파기, 그리고 주신호 제거회로 등으로 구성된 피드백 선로의 군지연 때문에 시스템 대역폭이 치명적으로 제한된다. 피드백 루프를 구성하는 출력 신호 추출 결합기와 대역 통과 여파기 사이에 NGDC를 추가함으로써 피드백 경로의 군지연을 조절하여 상쇄 대역폭이 증가 되도록 조절이 가능하다.

그림 5는 2-carrier WCDMA 신호를 인가한 경우 평균 출력 전력이 34 dBm 일 때 선형성 개선 전과 후의

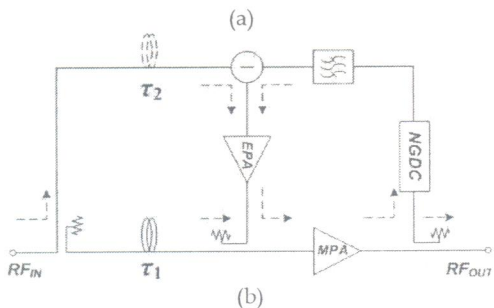
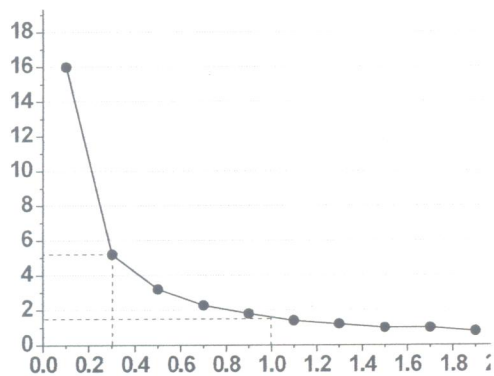


그림 4. (a) 군지연 부정합에 따른 20 dB 상쇄 대역폭 저하도, (b) NGDC 회로를 이용한 피드백 증폭기

출력 스펙트럼들을 보이고 있다. 사용된 WCDMA 신호의 PAPR은 0.01% 확률에서 10.8 dB이다. 평균 출력 전력이 34 dBm 일 때 ACLR은 -24.6 dBc 에서 -48.4 dBc 로 약 23.8 dB 개선되었다. 실제 측정시 관찰한 50 MHz 대역 전반에 걸쳐서 뛰어난 선형성 개선 효과를 확인할 수 있었다.

기준에 발표된 피드백 증폭기에 관한 연구 결과와 본 연구에서 제안하는 구조의 피드백 증폭기 사이의 결과들의 비교를 표 2에 정리하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 피드백 증폭기의 군지연 정합 문제로 인하여 아날로그 피드백 증폭기에 대한 연구는 거의 찾아보기 힘들다. 본 연구에서 결과로 얻은 50 MHz 이상의 상쇄 대역폭은 기존 연구 중 가장 넓은 대역폭을 얻은 결과의 최소 10 배 이상의 대역폭이다. 이는 본 연구 논문 작성 시점에 조사한 바에 의하면 아날로그 피드백 구조의 증폭기 중에서 가장 넓은 대역폭이었다.

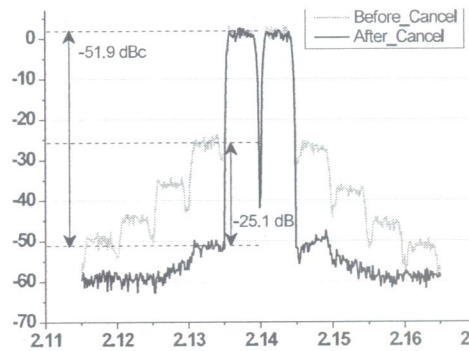


그림 5. 선형화 전/후의 2-carrier WCDMA 스펙트럼.

3. 결론

본 논문에서는 효율 증대 및 제작의 용이성을 위하여 분산소자 형태의 NGDC를 이용한 새로운 구조의 피드포워드 증폭기를 제안하였다. 중심주파수가 2.14 GHz인 WCDMA 하향대역에서 30 MHz 대역폭을 갖는 2단 NGDC를 이용한 새로운 구조의 피드포워드 증폭기를 제작하고 측정한 결과를 지금까지 보고된 연구 결과 중 가장 뛰어난 효율을 가짐을 확인할 수 있었다. 일반적으로 피드포워드 증폭기를 디지털 샘플러와 같이 상대적으로 낮은 주파수 대역에서 제작할때 군지연 대역통과 여파기의 크기가 매우 커서 전체 증폭기의 크기가 매우 커지고, 전체 이동통신 시스템의 구현에 제약사항으로 작용한다. 제안된 피드포워드 증폭기는

표 2. 이전 피드백 선형화 연구 결과와 성능 비교

	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	This work	
Frequency (GHz)	0.35	1.85	0.88	4.00	0.89	2.14	2.14
P_{lin} (dBm)	23	27	33	25	46	43	43
Test Signal	2-tone	2-tone	2-tone	2-tone	2-tone	2-tone WCDMA	
Cancellation BW (MHz)	6	0.5	6	1	1	> 50	> 50
Linearity (dBe)	-40	-42	-46	-40	-40	-51	-52
Improvement (dB)	8	20	12	8	16	22	25
Remarks	IMS '94	IMS '98	MWJ '05	TMTT '90	EL '95		

군지연 소자를 제거함으로써 선형개선 효과는 유지하면서도 효율개선특성을 얻을 수 있고, 군지연 선로 또는 군지연 여파기의 제거를 통해 전체 시스템의 크기를 줄일 수 있는 가능성을 제시하였으며, 아울러 제작비용 절감의 효과도 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

또한 본 연구에서는 NGDC를 이용함으로써 선형성 개선 대역폭을 상당히 증가시킬 수 있는 새로운 구조의 아날로그 피드백 증폭기의 구조를 제안하였다. 제작된 분산 소자 형태의 마이너스 군지연 회로를 이용하여 WCDMA downlink 대역에서 제안하는 아날로그 피드백 증폭기를 제작하였고 이를 실험적으로 검증하였다. 제작된 증폭기는 기존에 보고된 연구 중 가장 넓은 선형성 개선 대역폭을 갖는 것으로 확인되었다.

최근 기지국용 송신기에 있어서 디지털 전치왜곡 또는 디지털 궤환 전치왜곡 등의 선형화 방식이 새로이 각광받고 있으나, 제안한 피드포워드 선형화 기법은 여러 기술에 비해 여전히 많은 장점을 가지고 있다. 제안하는 구조는 전체 시스템에서 군지연 소자가 차지하는 부피 비중이 큰 낮은 동작주파수 대역의 응용에 매우 유용할 것으로 생각된다. 또한 본 연구를 통해 제작하였던 전력증폭기에 비해 더 큰 출력이 요구되는 선형 전력증폭기의 설계에서는 군지연 선로 여파기나 고출력 동축 케이블의 삽입 손실이 매우 심각한 RF출력 전력의 손실을 유발하므로, 제안하는 피드포워드 증폭기가 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

[1] N. Potheary, *Feedforward Linear Power Amplifier*, Artech House, pp. 125-138, 1999.
 [2] P. B. Kenington, *High-Linearity RF Amplifier Design*, Artech House, pp. 251-350, 2000.

[3] C. L. Larose and F. M. Ghannouchi, "Optimization of Feedforward Amplifier Power Efficiency on the Basis of Drive Statics," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, pp. 41-54, January 2003.
 [4] H. Noto, K. Yamauchi, M. Nakayama, and Y. Isota, "Negative Group Delay Circuit for feedforward Amplifier," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1103-1106, June 2007.
 [5] T. Ogawa, et al., "High Efficiency Feed-Forward Amplifier using RF predistortion linearizer and the modified Doherty Amplifier," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2004, pp. 537-540.
 [6] J. Yoon, C. Seo, "Improvement of Broadband Feedforward Amplifier Using Photonic Bandgap," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 11, no. 11, November 2001.
 [7] K. J. Parsons and P. B. Kenington, "The Efficiency of a Feedforward Amplifier with Delay Loss," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, pp. 407-412, May 1994.
 [8] K. J. Parsons and P. B. Kenington, "Effect of delay mismatch on a feedforward amplifier," *IEE Proc. Circuits Devices Syst.*, vol. 141, no. 2, pp. 140-144, April 1994.
 [9] K. Horiguchi, et al., "A High Efficiency Feedforward Amplifier with a Series Diode Linearizer for Cellular Base Stations," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2001, pp. 797-800.
 [10] J. G. McRory and R. H. Johnston, "An RF amplifier for low intermodulation distortion," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 1994, pp. 1741-1744.
 [11] Y. Kim, Y. Yang, S. Kang, and B. Kim, "Linearization of 1.85 GHz amplifier using feedback predistortion loop," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 1998, pp. 1675-1678.
 [12] L. Qiang, Z. Z. Ying, and G. Wei, "Design of a feedback predistortion linear power amplifier," *Microw. J.*, vol. 48, no. 5, pp. 232-241, May 2005.
 [13] A. K. Ezzeddine, H. Hung, and H. Huang, "An MMAC C-band FET feedback power amplifier," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, no. 4, pp. 350-357, Apr. 1990.
 [14] M. Faulkner, D. Contos, and M. Johansson, "Linearisation of power amplifiers using RF feedback," *Electronics Lett.*, vol. 31, no. 23, pp. 2023-2024, Nov. 1995.