

정규논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제18권 제6호, 2013년 11월 (JBE Vol. 18, No. 6, November 2013)

http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2013.18.6.884

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

에너지 효율적 차세대 방송망 구축을 위한 증폭기 특성과 신호 모델

한 재 신^{a)}, 전 성 호^{b)}, 최 정 민^{a)}, 서 종 수^{a)‡}

Characteristics of Power Amplifier for Energy Efficient Broadcasting Services

Jae-Shin Han^{a)}, Sungho Jeon^{b)}, Jeong-Min Choi^{a)}, and Jong-Soo Seo^{a)‡}

요 약

최근 지구 온난화에 따른 이산화탄소 배출량 감소 및 에너지 절약을 위하여 방송통신 기술 역시 에너지를 절약을 위한 연구가 시작되고 있다. 특히 방송통신 시스템의 전체 소비 에너지는 기지국에서 87.5% 이상 차지하고 있지만 물리계층에서 에너지 효율성에 관한 연구는 전송용량을 총 전력 단일 상수로 나누어 분석하기 때문에 실제적인 에너지 특성을 분석하는데 문제점이 많다. 본 논문은 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 실제 증폭기에 사용되는 트랜지스터의 특성과 신호 모델에 관하여 간략히 소개한다. 이는 에너지 효율적인 방송통신 시스템을 설계하는데 이용 가능한 비선형 증폭기의 신호모델 그리고 증폭기의 특성을 고려한 기지국의 총 전력 사용량까지 포함하여 효율적인 에너지 효율을 계산하는 데 중요한 이해를 제시한다.

Abstract

In this paper, we investigate the characteristics of power amplifiers and simplified memoryless non-linear power amplifier models for energy efficient communication system. First, we present the transfer function of GaAs FET (Gallium Arsenide Field Effect Transistor) that is widely used for high power amplifier. From those investigations, we introduce the instantaneous efficiencies and methods of amplification by assuming that the saturated current is constant, while perfect linearity is exploited under knee voltage. Then, we discuss four non-linear power amplifier models in a baseband signal processing. Finally, we explain the specified total power consumption model in a base station to achieve the reasonable analysis for energy efficient communication.

Keyword : Energy Efficient, Power Amplifier, Green

a) 연세대학교 전기전자공학부(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

b) 한국방송공사기술연구소(Technical Research Institute, Korean Broadcasting System)

‡ Corresponding Author : 서종수(Jong-Soo Seo)
E-mail: jsseo@yonsei.ac.kr
Tel: +82-2-2123-2878

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A2A2A01011372).

· Manuscript received August 29, 2013 Revised October 21, 2013

Accepted October 21, 2013

1. 서 론

IT 정보 통신 기술은 언제 어디서든 사용자에게 고속, 고품질의 다양한 QoS (Quality-of-Service) 제공을 주요 목표로 빠르게 발전하였다. 이는 사용자의 정보 획득 편리성을 보장하는 반면에 한정된 네트워크 내의 데이터 트래픽 (Traffic) 및 물리적 장치를 증가시킴으로서 소비 에너지의 증가 등 새로운 문제점들을 야기하게 되었다. IT 관련 시스

템의 높은 에너지 요구는 서비스 사업자의 유지비용 OPEX (Network Operators' Overall Expenditures) 문제 뿐 아니라, 직접적으로 온실효과의 주범인 이산화탄소 배출 증가로 직결되었다. 따라서 최근 10년간 지구 온난화 방지를 위한 에너지 소비를 줄이는 방안으로써 전 세계적으로 "Green"이라 불리는 기술에 동참하여, 무선 트래픽의 급격한 증가와 에너지 소비로 인한 난제들을 해결하기 위해 그린 혁명 (Green Evolutions) 이 방송통신에 필요하게 되었다^[1]. 기존 3세대 통신은 2세대 통신과 비교 시 약 10배의 높은 전송 효율을 가지고 있고 4세대 통신은 3세대 통신과 비교 시 약 3~4배의 높은 전송 효율을 가지고 있지만 4세대 통신은 같은 셀 커버리지 안에서 2세대 통신과 비교 시 약 60배 이상의 에너지를 소비하고 있다^[2]. 또한 단일 주파수 망을 활용한 DVB (Digital Video Broadcasting) 시스템 역시 에너지 효율성을 고려하지 않고 주파수 효율적 측면에서만 연구되고 있다^[3]. 이는 지금까지 기술 발전이 방송통신네트워크는 데이터 처리량과 전송 신호 오류 개선에 중점을 두고 있었기 때문이며, 최근에는 에너지 효율적 분야에 관심을 보이기 시작했다. 현재 녹색 방송통신 시스템을 위한 연구는 에너지 효율적 또는 재생 에너지에 관련된 연구가 진행 중이며 사용된 자원의 지속성 또는 공간적 절약, 절거 비용, 기계 보수 및 유지비용까지 확장되어 연구되고 있다^[4]. 국내적으로는 아직 에너지 효율적 통신을 위한 연구가 진행되지 않고 있으며 세계적으로는 녹색 기지국 시스템 구축, 에너지 효율적인 단말기 설계, 계층적 또는 분산된 기술로 에너지를 관리하는 기법 등이 논의되고 있다. 유럽 의회는 FP7 (Seventh Framework Projects) 인 EARTH (Energy Aware Radio and network Technologies), TREND (Towards Real Energy-Efficient Network Design), C2POWER (Cognitive radio and Cooperative strategies for POWER saving in multi-standard wireless devices) 등 녹색 단계를 구성하여 다양한 연구를 진행하고 있다. 최근 [5]에서 제시한 연구 결과에 따르면 현재 전기 및 신호처리 영역에서 기지국의 전력 감소를 위해 점진적인 연구가 계속되고 있으나, 고용량 데이터 전송용량을 충족시키기 위한 에너지 소비 증가량을 감소하는 데 부족함이 있다. 특히 약 3억 개의 기지국은 4.5GWatt를 소비하며 이는 매년 20Mt

의 이산화탄소를 배출하고 있다. 이는 총 사용하는 전력의 50~80%가 기지국의 증폭기에 의해 소비되는 자원이며, 그 외 나머지 지원은 AC (Alternating Current)/DC (Direct Current) 전환, 케이블링, 냉각 시스템 등에 의해 분산되고 있다. 따라서 유연한 전송 기술을 적용하여 기지국 전송 파워를 줄이는 기술이 필요하다^[6]. 에너지 효율은 스펙트럼 효율에 사용되는 총 전력량을 나누어 계산한다. 하지만 현재 에너지 효율에 사용되는 총 전력은 단일 상수로 가정하고 있으며 세부적인 에너지 소비 인자를 분석하는 데 한계점이 있다. 또한 국내에서는 이러한 관계를 소개하는 문헌이 없으며 에너지 효율성에 관한 연구도 미비한 상황이다. 따라서 본 논문은 에너지 효율적 방송통신 시스템을 구축하기 위하여 기존의 문헌을 바탕으로 전력 증폭기로 사용되는 트랜지스터의 특성과 기저 대역에서 다루지는 비선형 증폭기의 신호 모델 그리고 증폭기의 인자를 고려한 기지국의 총 전력 사용 모델에 대하여 소개하고 에너지 효율성과 전력 효율성의 관계를 다룬다. 이는 에너지 소비의 주요 원인인 전력 증폭기의 신호 모델을 정확히 정의하여 이후 다양한 방송통신 시스템연구에 중요한 기초 지식이 되는 것을 목표로 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II절에서는 회로 기반의 전력 증폭기의 특성에 대하여 다루고 현재 사용하는 증폭 수식이 어떤 식으로 유도 되는지 소개한다. III절에서는 이를 기반으로 현재 방송 통신 시스템에서 사용되는 간소화된 수학 모델에 대하여 소개하고 에너지 효율성과 주파수 효율성의 관계에 대하여 논의한다.

II. 전력 증폭기의 특성

1. GaAs FETs의 특성

GaAs FET (Gallium Arsenide Field Effect Transistor)는 현재 통신 증폭기에 가장 널리 사용되는 기기이며, 역사적으로 1960년대 처음으로 개발된 이후로 미국 연방정부의 MIMIC (Millimeter Wave Monolithic Integrated Circuit) 프로그램을 통하여 1980년대 산업화되었다^[7]. 이후 약 20여 년간의 개발 기간을 거쳐 GaAs FET는 위성 통신 뿐 아

나라 WLAN (Wireless LAN) 서비스 까지 포함하여 가장 기본적인 RF (Radio Frequency)단의 솔리드 스테이트 (Solid State) 장치가 되었다. 이후 GaAs HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) 로 발전되며 현재 이동통신 증폭기의 대부분을 차지하게 된다. 증폭기를 가용하기 위해 GaN FET등이 개발 되었지만 처음부터 개발되었던 GaAs FET 기술이 높은 주파수에서 안전하게 작동되며 선형성이 유지되었다. 또한 GaAs FET이 이동통신에 기본 장치로 채택되면서 대량생산을 통한 가격 감소로 이어지며 최근 GaAs의 기술을 진보시키기 위한 많은 연구가 진행되었다^[8].

GaAs는 기본적으로 전기 특성이 좋은 물질들로 구성되어 있으며, 주요 물질은 AlGaAs와 InGaAs로 구성되어 있다. GaAs기반의 물질은 높은 전자 이동성을 가지고 있기 때문에 이러한 높은 이동성을 가진 GaAs는 저항의 특성을 쉽게 분석할 수 있으며 채널에 존재하는 전자들이 포화 지점까지 도달하기위한 빠른 가속력을 가지게 된다^[9]. 이러한 특징들은 다른 결합 방법들을 이용하여 가속력을 증대시킬 수 있고 전자량을 조절할 수 있는 공간을 활용하게 하여 장치의 성능을 증대시킬 수 있다. 다음으로 GaAs를 사용하는 중요한 이유는 기질간의 저항성인데 이는 장치의 끝단에서 발생하는 신호의 감쇠를 최소화 하기 위해서다. 높은 순도를 가진 GaAs는 높은 저항성을 지니게 되어 반절연체 (Semi-insulating) 로 간주되어진다. 높은 저항성이 발생하는 이유는 페르미 레벨 (Fermi-level) 이 전자가 존재할 수 없는 금지대 (Forbidden Band)에서 매우 깊게 고정되어 있기 때문에 EL2 (Electron Level 2)의 결정 결함 (Crystal Defect) 이 페르미 레벨 근처에 발생된다. 따라서 EL2가 매우 깊다면 아주 적은 자유 전자 또는 정공이 전류흐름에 사용된다. 일반적으로 순수 GaAs의 저항은 약 $10^6 \Omega - cm$ 정도이며 반도체 생산자는 아주 적은 양의 탄소를 결합하여 저항의 특성을 바꾸어 사용하며 SI GaAs는 $10^8 \Omega - cm$ 의 저항 특성을 나타낸다.

반도체는 어떤 물질을 사용하더라도 이상적인 것은 없기 때문에 GaAs역시 단점이 존재한다. 가장 큰 단점으로는 상대적으로 낮은 열전도율을 가지고 있고, 자연발생 산화층 (Native Oxide) 또는 불활성제가 존재하지 않는다. 열전도율이 낮게 되면 높은 출력을 요구하는 증폭기 설계에 있어

서 열 방출이 늦어지는 문제점이 발생되며, 후자의 경우 불완전한 패시베이션 (Passivation)에 의하여 느린 준위 (Slow State)를 발생시킨다^[10]. 결론적으로 GaAs FET MIMIC 혹은 MMIC (Monolithic microwave integrated circuit) 은 모든 회로 인자들이 GaAs의 기질 안에 결합되어 있으며 군사용뿐만 아니라 이동통신, 방송통신, 위성통신, 무선 LAN에 널리 사용 되고 있다. MMIC은 다양한 대역에 맞게 제작되며 가장 널리 사용 되는 것은 GaAs MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor), HEMT (High Electron Mobility Transistor), HBT등이 존재한다. 이러한 MMIC는 대부분 RF 와 마이크로웨이브 송신단에서 사용하고 있다. 표 1과 표 2는 대표적으로 협소대역 및 광대역에서 사용되

표 1. 협소대역에 사용되는 고효율 증폭기의 성능 파라미터
Table 1. Characteristics of narrowband MMIC power amplifiers

주파수 (GHz)	스테이지 수	이득 (dB)	전력 (W)	효율 (%)	장치	기술
2.1-2.2	2	21	50	50	pHEMT	GaAs
4.5-5.4	1	10	14	55	MESFET	GaAs
8-10	3	24	12	40	MESFET	GaAs
8-10	3	24	20	35	MESFET	GaAs
12-15	3	18	8	25	MESFET	GaAs
13.5-15	3	22	8	22	pHEMT	GaAs
29-31	3	20	4	25	pHEMT	GaAs
42-46	2	17	2.8	24	pHEMT	GaAs
95	2	15	0.43	19	pHEMT	-

표 2. 광대역에 사용되는 고효율 증폭기의 성능 파라미터
Table 2. Characteristics of broadband MMIC power amplifiers

주파수 (GHz)	스테이지 수	이득 (dB)	전력 (W)	효율 (%)	장치	기술
2-8	1	9	1.4	18	HBT	GaAs
2.5-5.5	2	17	2	30	MESFET	GaAs
4.5-9	2	17	2	25	MESFET	GaAs
4.7-10	1	7	5	8	사파이어	GaN
6-18	3	22	2.3	20	pHEMT	GaN
0.7-2.7	2	20	12	22	MESFET	GaAs
1.35-2.8	2	23	12	28	MESFET	GaAs
2-6	2	15	10	26	MESFET	GaAs
2-8	2	13.5	8	16	MESFET	GaAs

는 높은 효율의 증폭기의 예시를 나타낸다^[10].

2. 트랜지스터 증폭기의 작동 특성

그림 1은 GaAs MESFET 증폭기의 전류 전압 특성을 나타낸다^[11]. 위 그림의 주요 특징은 점선으로 그려지는 드레인(Drain)의 전류 전압 곡선과는 달리 커패시터(Capacitor) 또는 저항기부에서 가해지는 실선의 전류 전압 특성이 다른 것을 1dB, 3dB 억압점(Compression Point)으로 보여주고 있다. 예를 들어 그림 1에서 드레인 소스 전압이 8V가 가해진다면 네트워크는 각각의 로드에서 최대의 증폭기 효율을 가지게 된다. 이후 RF의 전력은 주기성을 나타내기 때문에 실선은 회전하는 방향으로 발진하는 모양을 가지게 된다. 증폭기 네트워크의 이러한 특성들은 장치 고유의 도핑 물질에 의해 발생된다. 일반적으로 로드에서 인가되는 전압은 입력 신호의 크기와 증폭기 DC전압에 결정된다. 그러므로 그림 1에서 보이는 전류 전압 곡선은 기본적인 증폭기 작동 원리에 대하여 설명 가능하다. 위와 같은 실제 결과를 수학적으로 단순화하기 위하여 트랜지스터는 드레인 단에서의 전류 전압 특성만을 고려한다고 가정한다. 기본적으로

로 증폭기는 두 개의 포트에 구성된 네트워크로 만들어지며 소스는 입력 신호가 로드를 거쳐 출력신호로 나오게 된다. 여기서 중간 네트워크는 이상적인 전달 함수 내에서 이득을 가지고 있다고 가정하기 때문에 입력 신호는 네트워크를 거쳐 출력 신호에서 증폭된 신호를 얻을 수 있다. 따라서 출력되는 값과 로드 임피던스는 최대의 RF 출력을 나타낼 수 있다. 수학적으로 구체화하기 위하여 네트워크에서 로드에서 전달되는 전력 P_L (출력 신호)은 다음과 같이 정의된다^[10].

$$P_L = \frac{1}{2} Re(V_L I_L^*) = \frac{1}{2} |I_L|^2 R_L \quad (1)$$

여기서 V_L 과 I_L 은 로드 임피던스에 가해지는 전압과 전류를 나타내며 R_L 은 로드 저항의 실수 부분만을 의미한다. 또한 연산자 $(\cdot)^*$ 과 $|\cdot|$ 는 심벌의 켤레 (Conjugate) 및 절댓값 연산을 나타낸다. 식 (1) 에서 로드에서 전달되는 전력은 또한 반사 계수에 의해 다시 쓸 수 있으며 그 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_L = P_{out} [1 - |\Gamma_L|^2] \quad (2)$$

식 (2)에서 P_{out} 은 네트워크로부터 이용 가능한 최대 RF 출력을 나타내며 Γ_L 는 로드에서 발생하는 반사 계수를 나타낸다. 만약 반사 계수가 로드에서 존재하지 않는다면 최대 RF 출력은 $\Gamma_L = 0$ 에서 발생하게 된다. 이러한 환경은 로드 임피던스가 네트워크 출력 임피던스 동일할 때 발생되며 이는 대체 표현으로 $Z_L = Z_{out}^*$ 로 표현 가능하다. 이를 통해 전력이 가해진 증폭기의 효율 PAE (Power Added Efficiency)를 구할 수 있는데 그 식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$PAE = \frac{P_L - P_{input}}{P_{DC}} \times 100 \quad (3)$$

식 (3)에서 P_{input} 은 네트워크 (증폭기)에 가해지는 입

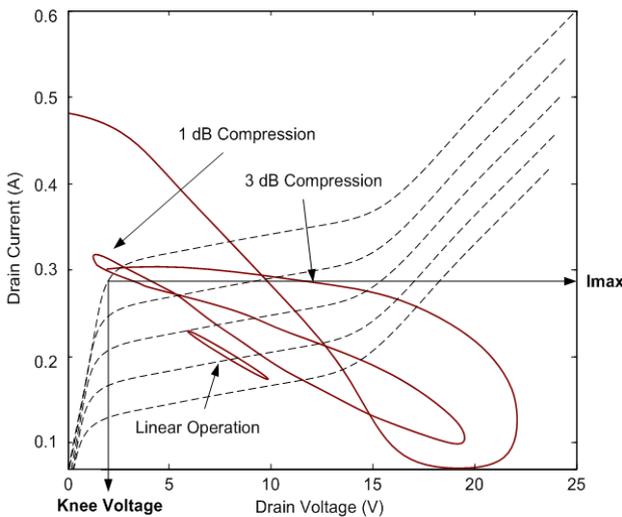


그림 1. GaAs MESFET 증폭기의 DC 전류 전압 특성 그래프에서 로드에서 가해지는 동적 (Dynamic) 동작의 궤적 곡선
 Fig. 1. DC I-V characteristics for GaAs MESFET

력 전력, P_{DC} 는 네트워크를 동작시키기 위한 DC전력을 나타낸다. 여기서 본 논문은 증폭기의 효율성을 PAE로 표현하였지만 증폭기의 효율은 다른 방법으로 표현 가능하다. 예를 들어 드레인 효과만 고려한 효율성은 P_L/P_{DC} , 전체 효율은 $P_L/(P_{input} + P_{DC})$ 로 각각 표현할 수 있다. 일반적인 방송통신 시스템에서 로드에 가해지는 전력이 입력 전력보다 크므로 ($P_L \gg P_{input}$, $P_{DC} \gg P_{input}$) 각각의 효율성은 모두 동일하다고 가정할 수 있다^[12]. 따라서 본 논문은 특별한 언급 없이 이해를 용이하게 하기 위하여 3가지 효율성을 혼용하여 사용하도록 한다.

3. 증폭기의 동작 클래스

그림 1에서 제시한 전류 전압 특성을 어깨 전압 이외의 지점에서는 싱크 전류 (Sink Current)가 상수이고 게이트의 전압이 임계값 이하로 떨어졌을 때 전류가 완전히 차단된다고 가정하고 포화지점의 전류는 I_{max} 로 두어 임계값과 포화지점 사이의 입력 전압과 출력 전류는 선형성을 가진다고 가정하는 상황을 고려하자. 이와 방식 특성을 이상적으로 다루게 된다면 증폭기의 하모닉 (Harmonic) 성분들을 효율적으로 제거 또는 활용하기 위한 방법으로 증폭기는 이용 방법에 따라 Class A부터 Class S 까지 다양하게 정의되어 있다^[13]. 하지만 모든 증폭 방법은 Class A 와 B를 통하여 얻을 수 있으므로 본 논문은 Class A와 B만 다루도록 한다.

3.1 Class A

Class A로 동작하는 증폭기는 모든 입력 신호의 크기 기준 선형성 (Quasi-linear) 영역에서 작동된다. 최대의 출력 효율을 가지기 위해서 장치는 $I_{max}/2$ 의 고정된 바이어스를 공급받으며 입력 전압은 준 선형 공간에서 존재해야 한다. 즉 Class A 증폭기의 모든 활동 영역은 모든 시간이 되며 소스에 흐르는 전류는 게이트와 바이어스에 의해 조절된다. 입력 신호가 사인 곡선을 따른다고 가정하면 Class A로 동작하는 증폭기의 RF 출력 신호는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$P_L = \frac{I_{max}}{2\sqrt{2}} \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{DC}V_{DC}}{2} \quad (4)$$

식 (4) 에서 DC로 인가되는 전압은 $P_{DC} = I_{DC}V_{DC}$ 가 된다. 증폭기 효율성을 간단히 하기 위하여 드레인 효과만 고려한 증폭기의 출력 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$\eta_{class A} = \frac{P_L}{P_{DC}} \quad (5)$$

식 (4)를 (5)에 대입하여 계산하면 Class A의 효율은 1/2이 되므로 50%가 됨을 알 수 있다. Class A의 증폭기는 IBO (Input Back-off)를 사용하더라도 입력 신호와 1차 함수 관계에 있기 때문에 효율성을 쉽게 구할 수 있다. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 을 사용하는 통신 시스템에서 변조된 신호의 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) 이 약 6dB정도 가정한다면, Class A로 신호를 증폭하기 위해서는 출력 효율이 50%에서 20~25%로 감소된다. 따라서 Class A를 이용한 전력 증폭기는 무선 통신 시스템에서 사용되지 않는다. 하지만 Class A는 선형성이 매우 뛰어나고 하모닉 성분들을 고려할 필요가 없어서 GHz 주파수에서 광역 증폭기로 사용되거나 Class B 증폭기와 결합하여 사용 된다^[7].

3.2 Class AB, Class B

Class A에서 Class AB로 발전하게 되는 주요 동작 원리는 기본적인 작동 원리는 같으나 트랜지스터 동작 바이어스 (Quiescent Bias) 흐름을 I_{max} 의 10%정도 수준의 상대적인 값으로 설정하여 이용한다. 이러한 방법은 FET 계열의 경우 게이트 바이어스를 임계값으로 근접시켜 구현할 수 있다. 따라서 트랜지스터의 동작은 전체 시간 중 절반만 사용되며 입력 신호는 I_{max} 를 따라 신호가 움직이지만 사인 곡선의 음수 부분은 임계값 밑으로 내려가기 때문에 전류가 단절된다. Class AB에서 0 바이어스 인 경우 Class B로 분류된다. Class AB를 포함한 Class B의 성분들은 π 주기로 전류가 전달되기 때문에 다음과 같이 간단한 식으로 표현 가능하다.

$$I_{DC} = \frac{I_{max}}{\pi} \quad (6)$$

Class A와 마찬가지로 식 (6)을 로드 에 가해지는 RF와 DC 전력의 식을 Class A 환경과 동일하게 표현 가능하다

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{V_{DC} I_{max}}{4} \\ P_{DC} &= \frac{V_{DC} I_{max}}{\pi} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (5)와 같은 방법을 사용하면 Class B의 효율성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{classB} = \frac{P_L}{P_{DC}} \quad (8)$$

식 (8)에서 출력 효율은 $\pi/4$ 가 되며 이상적인 가정 이므로 값은 약 78.5%가 된다. 낮은 레벨의 신호에서 Class B는 Class A보다 더욱더 효율적이며 평균 효율성은 Class A보다 약 5배 정도 뛰어나다. Class B는 HF (High Frequency) 이상의 광대역 증폭기로 사용된다.

3.3 그 외 증폭 모델

그 이외의 증폭 모델은 Class A와 B로 파생되어 만들어진 모델이며 기본 증폭 방법보다는 효율성이 뛰어나다. 하지만 일반적으로 신호처리 관점에서는 사용되지 않기 때문에 본 논문에서는 간단히 다루도록 한다. Class C는 게이트는 임계점 밑으로 바이어스 시켜 증폭기의 작동 시간이 Class B보다 작게 이용된다. 선형성은 없지만 효율성이 증대되는 특징을 가지고 있으며 이상적인 효율은 약 85%이다. Class C는 진공 전송단에서 사용되나 실제로 사용되지는 않는다. Class D는 2개 혹은 그 이상의 증폭기가 서로 교환하며 구형파의 신호를 만들어낸다. 이상적으로 스위칭 시간이 빠르다면 Class D는 100%의 효율을 보이지만 전류 포화, 스위치 속도의 문제, 드레인의 커패시터 영향에 의하여 많은 손실이 발생한다. Class E같은 경우 단일 트랜지스터가 마치 스위치처럼 작동된다. 따라서 드레인 단에서 발생하는 파형은 DC 성분과 RF 전류 등의 합으로 표현된다.

이상적인 작동 환경에서는 효율성이 100%를 가진다.

III. 방송통신시스템을 위한 전력 소모 신호 모델

II절을 통해 본 논문은 기본적인 증폭기의 동작 원리와 효율성에 대하여 다루었다. 이를 기반으로 수학적으로 분석 및 예측이 가능한 신호 모델을 정립하기 위하여 이번 절에서는 무선 통신 시스템에서 이용 가능한 증폭기의 수학적 신호 모델링에 관하여 소개하도록 한다.

1. 변조된 송신 신호의 모델링

첫째로 증폭기에서 출력되는 신호는 로드로 전달되며 최대 파워는 일반적으로 증폭기의 출력 로드 임피던스의 쉘레 값이 매치되므로 II절에서 논의되는 출력 신호는 시간의 평균으로 다음과 같이 표현 가능하다.

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} v(t)i(t)dt \quad (9)$$

여기서 T 는 주기를 나타내고 $v(i), i(t)$ 는 시간 t 에 따른 전압 전류를 나타낸다. 회로에서 상대적인 저항 R 이 인가되었을 때 식 (9)는 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$P_{out} = \frac{V_o^2}{2R} \quad (10)$$

여기서 V_o 는 입력 신호의 크기를 나타낸다. 식 (3), (8)과 같이 증폭기 효율에 대해 변환하면 로드 에 전해지는 전력은 증폭기 출력 전력으로 표현할 수 있으며 그 효율성은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} \eta_D &= \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad \circ \\ PAE &= \frac{P_{out} - P_{input}}{P_{DC}} \end{aligned} \quad (11)$$

일반적으로 최대 효율은 최대 출력에 도달하므로 전력 효율을 알 수 있다면 최대 출력 값을 예측 가능할 수 있다. 증폭기의 효율은 출력 전압에 선형적으로 증가하므로 식 (10)을 통해 출력 전압의 제곱근 관계에 있음을 알 수 있다. 최근 대부분 증폭기는 최대 효율에 도달해 있기 때문에 이러한 신호 모델은 유용하게 활용할 수 있다. 하지만 방송 및 통신 시스템에서, PSK (Phase Shift Keying)과 같은 단일 크기의 변조 방식을 사용하더라도 장치 내부에서 커패시터에 의한 충전 효과가 발생하여 평균 효율이 전체 시스템 관점에서 더욱더 중요한 요소가 된다. 따라서 평균 효율은 식 (11)을 평균한 값으로 얻어지며 그 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{ave} = \frac{P_{outave}}{P_{DCave}} \tag{12}$$

식 (12)의 P_{outave} 는 식 (10)의 V_o 대신 시간에 따른 입력 신호의 포락선을 나타내는 $A(t)$ 의 함수로 표현한 것을 나타낸다. 일반적으로 $A(t)$ 의 함수의 확률 밀도 함수는 주어진 크기의 전압을 일정 시간동안 사용한 양으로 정의된다. 따라서 신호간의 시간적 상관도가 존재하지 않는다고 가정하였을 때 입력 신호는 평균이 0이고 분산이 P_{input} 인 정규 분포로 간주할 수 있다. 또한 송신단에서 IBO를 고려하기 위하여 최대 입력 신호에 상수를 곱한 $P_{input} = P_{inputmax}\xi$ 을 이용하기도 한다. 여기서 ξ 는 0부터 1까지 실수 값으로 결정되며 증폭기의 선형성을 유지하기 위해 결정되는 값이다. IBO를 고려한 신호 모델에 관하여는 II.2절에서 논의 된다.

2. 증폭 방법의 모델링

수학적으로 간략화 한 입력 신호의 모델은 증폭기 특성에 따라 변형이 일어나게 된다. 무선 통신 시스템에서 고용량 전송을 위하여 보다 많은 대역폭과 전송 전력을 필요로 하고 있지만 증폭기는 열 잡음, 트래핑 효과 (Trapping Effects)와 반도체 내부에 존재하는 커패시터에 의해 예측 불가능한 비선형성을 나타내게 된다. 이러한 효과는 시스템이 5MHz이상의 광대역 통신 시스템에서 나타나는데, 이

러한 효과는 Wiener-Hammerstein 모델과 같은 고차 방정식으로 구성되어 있지만 신호를 명료화 하는데 복잡성이 따른다^[13]. 따라서 시간적 출력 신호는 과거 또는 미래의 신호에 영향을 끼치지 않는다는 메모리가 존재하지 않는 모델에 대하여 연구가 진행 되었다. 메모리 효과를 고려하지 않은 전력 증폭기는 독립적인 확률 분포가 적용되며 메모리 효과를 고려한 전력 증폭기와 비교하여 성능 열화의 흐름이 비슷하기 때문에 널리 사용된다. 따라서 기저대역 통신을 가정한 증폭기의 비선형성에 대하여 널리 연구가 되어 있으며 일반적으로 사용되는 비선형성을 나타내는 모델은 다음과 같은 4가지 모델들을 가장 널리 사용한다^{[14][17]}.

2.1 Saleh 모델

Saleh 모델은 메모리 효과를 고려하지 않은 증폭기의 비선형성을 실험하기 위해서 가장 널리 사용되며 TWTA (Traveling Wave Tube Amplifiers)의 AM (Amplitude Modulation) 및 PM (Phase Modulation)의 변형을 표현하는데 사용된다. Saleh 모델을 사용하는 목적은 특정 선형 시스템 또는 제안된 기술에서 보다 정확한 환경을 제시하는데 사용되며 2개의 모델에 해당하는 기저대역의 전달 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A(x) &= \frac{\alpha_1|x|}{1 + \alpha_2|x|^2} \\ \Phi(x) &= \frac{\beta_1|x|^2}{1 + \beta_2|x|^2} \end{aligned} \tag{13}$$

여기서 $A(x)$ 와 $\Phi(x)$ 는 입력신호 x 의 출력 및 위상 변화 함수를 나타내며 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 는 비선형성 계수로 그 값에 따라 증폭기의 비선형도를 결정한다. 예를 들어, 가장 널리 사용되는 계수는 $\alpha_1 = 2.1587, \alpha_2 = 1.1587, \beta_1 = 4.033, \beta_2 = 9.104$ 가 있다. 이러한 상수를 결정하면 포화 지점의 전력을 얻을 수 있으며 정규화된 출력 값은 실제 증폭기를 구현하는 데 이용된다.

2.2 Ghorbani 모델

Saleh 모델은 GaAs FET 증폭기의 AM/PM 특성을 잘 나

타내는 반면 TWTA 증폭기에만 한정되어 있기 때문에 솔리드 스테이트 증폭기의 AM/AM 특성을 잘 나타내지 못한다. 따라서 Ghorbani 모델은 Saleh 모델을 개선하였고 낮은 전력 FET 증폭기에 더 적합 하도록 설계되어 있으며 그 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(x) = \frac{\alpha_1|x|^{\alpha_2}}{1 + \alpha_3|x|^{\alpha_2}} + \alpha_4|x| \quad (14)$$

$$\Phi(x) = \frac{\beta_1|x|^{\beta_2}}{1 + \beta_3|x|^{\beta_2}} + \beta_4|x|$$

여기서 α_i, β_i ($i=1,2,3,4$)는 비선형성 계수를 나타내며 사용되는 계수는 식 (13)과 거의 동일하게 사용된다. 식 (14)에서 가장 널리 사용되는 표준 상수는 $\alpha_1 = 8.1081$, $\alpha_2 = 6.5202$, $\alpha_3 = 1.5413$, $\alpha_4 = -0.0718$, $\beta_1 = 4.6645$, $\beta_2 = 10.88$, $\beta_3 = 2.0965$ 그리고 $\beta_4 = -0.003$ 가 있다.

2.3 Rapp 모델

Rapp 모델 역시 Ghorbani 모델과 같이 Class AB의 솔리드 스테이트 전력의 포락선을 모델링 하는데 용이하지만 차이점은 이득의 함수만을 표현한다. Rapp 모델 아주 낮은 진폭 값에 선형성을 가지는 특징을 나타내지만 이상적인 전달 함수를 관찰하는데 사용되지는 않는다. Rapp 모델의 수학적 수식은 다음과 같이 표현 된다.

$$A(x) = |x| \left(1 + \left(\frac{|x|}{x_{sat}} \right)^{2p} \right)^{-\frac{1}{2p}} \quad (15)$$

여기서 p 는 평탄성 (Smoothness)를 나타내는 상수이며 선형 지점에서 포화 지점 사이에 발생하는 휘어짐의 특성을 나타낸다. 일반적으로 $p = 3$ 이 가장 널리 사용된다. 그리고 x_{sat} 는 입력 신호 x 의 크기가 포화 영역에 도달하였을 때 전력을 나타낸다.

2.4 Soft Limiter 모델

그림 1에서 보는 바와 같이 증폭기의 전압 특성은 선형

지점과 포화 지점으로 나뉘어 있으며 포화 지점의 전압이 동일하고 Saleh 또는 Ghorbani 모델과 달리 위상의 변화가 없다고 가정하면 식 (15) 처럼 전압의 전달 함수로 표현 할 수 있다. 하지만 증폭기 설계 관점에서 포화지점으로 도달하는 영역은 증폭기 설계 단계에서 중요한 부분으로 간주되지 않기 때문에 극단적으로 선형 지점 그리고 포화지점으로 간단히 나눌 수 있는 Soft Limiter 모델이 제시되었다. Soft Limiter 모델은 다른 모델과 다르게 간단하면서도 증폭기의 비선형성을 잘 나타내기 때문에 수학적 가정에서 많이 사용하는 방법이며 그 식은 다음과 같이 표현된다.

$$A(x) = \begin{cases} g|x|, & \text{if } |x| < x_{sat} \\ x_{sat}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

여기서 g 는 증폭기의 이득을 나타내며 x_{sat} 은 식 (15)에 정의되어 있다.

3. 기지국에서 사용되는 총 전력량 모델링

에너지 효율적인 방송 또는 통신 시스템을 구현하기 위하여 증폭기의 특성 뿐 아니라 소요되는 전체 에너지도 중요한 요소가 된다. 총 전력량은 각각의 세부 요소를 고려하여 설계되며 기지국에서 신호를 전송하기 위해 소비되는 총 전력량 식은 다음과 같이 모델링 가능하다^[18].

$$P_c = (1 + C_{PS})(1 + C_{CB})(P_{BB} + P_{RF} + P_{PA}) \quad (17)$$

식 (17)에서 C_{PS} 는 전원 공급 상수를 나타내며 일반적으로 0.1과 0.15사이의 값을 사용한다. 또한 C_{CB} 는 능동 냉각기 및 배터리 상수로 0.4 미만의 값으로 결정된다. P_{BB} , P_{RF} 그리고 P_{PA} 는 기지대역의 전력 소모량, RF 모듈의 전력량 그리고 전력 증폭기에서 사용되는 전력량을 각각 나타낸다. 식 (17)에서 보는 바와 같이 증폭기에 사용되는 전력량이 다른 성분들과 독립적으로 구분 할 수 있으며 PLF (Power Loading Factor) 또는 증폭기의 특성에 맞게 조절할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 송신단에서 IBO를 고려하기 위하여 III.1절에서 제시한 $P_{input} = P_{input\max}\xi$ 를 식

(17)에 넣어 다음과 같은 구체적 전력 소비 모델을 결정할 수 있다^[12].

$$P_c(\xi) = (1 + C_{PS})(1 + C_{CB})(P_{BB} + P_{RF}) + P_{\max}(c_1 + c_2 \sqrt{\xi}) \quad (18)$$

식 (8)과 (10)에서 얻어진 Class 별 증폭기 효율을 이용하면 변수 c_1 과 c_2 는 Class A인 경우 $\pi c/2$ 와 0으로 나타나고 Class B 0과 c , 마지막으로 l -way Doherty 방식은 $(-c/l, (l+1)c/l)$ 을 대입하여 구할 수 있다. 여기서 $1/l^2 < \xi \leq 1$ 의 특성을 나타내며, 상수 c 는 실제 실험 결과로 얻어진 값이며 4.7이 사용된다. Doherty 방식은 각 Class를 이용하여 증폭하였을 때 선형 지점만을 이용하여 증폭기를 스위치 하는 방법으로 현재까지 가장 널리 사용되는 증폭 방법 중 하나이다. 식 (18)의 주안점은 기지국에서 사용하는 전력량과 증폭기의 전력량을 개별적으로 간주 할 수 있으며 증폭기의 전력을 효율적으로 관리할 수 있다는 것을 보여준다.

4. 전력 증폭기와 에너지 효율성의 관계

식 (18)과 같은 전력 증폭의 모델은 에너지 효율성과 주파수 효율의 관계를 정확하게 설명할 수가 없다. 왜냐하면 대부분 전력 증폭기의 효율성은 포화 지점 근처에서 최대의 효율을 나타내며 그 효율성에 적합한 데이터 전송 시스템을 설계하기 때문이다^[7]. 따라서 [12] 논문에서는 주파수 효율에 적합한 다중 증폭기를 사용하여 에너지 효율을 높이는 방법을 제시하고 있다. 일반적으로 에너지 효율은 주파수 효율에 총 전력량을 나누어 얻을 수 있기 때문에 식 (18) 또는 상수를 나누어 직관적으로 그 수치를 얻어낼 수 있다.

명확한 결론을 얻어내기 위하여 그림 2는 증폭기 효율이 각각 60%, 50%, 40%, 30%인 증폭기를 특정 데이터율을 만족시키기 위해 에너지 효율이 얼마나 발생하는 상관관계를 보여주고 있다. 다시 한 번 강조하지만 4개의 증폭기가 효율이 다르더라도 각각의 증폭기가 사용 가능한 전송용량이 있기 때문에 ‘<’에서 나타나는 바와 같이 전송용량 대

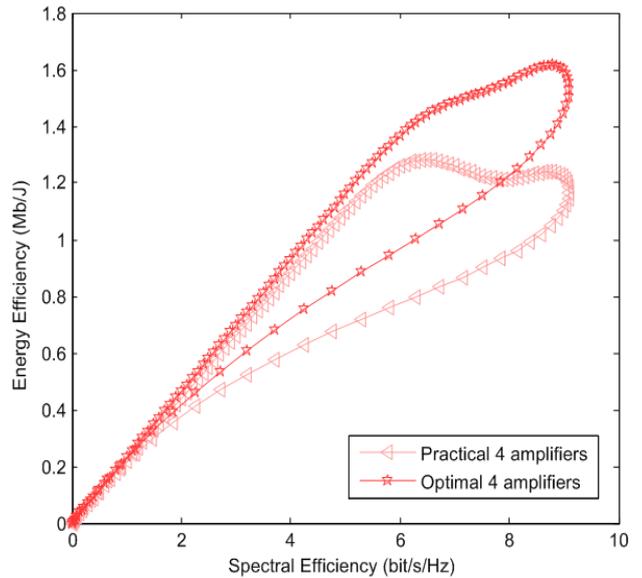


그림 2. 주파수 효율과 에너지 효율의 상관 관계
Fig. 2. Trade-off of spectral efficiency and energy efficiency

비 에너지 효율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 고 효율 증폭기를 각 데이터율 별로 사용하게 된다면 ‘☆’에서 나타나는 바와 같이 선형 형태로 에너지 효율을 증대시킬 수 있음을 보이고 있다. 이는 그림 2와 같은 에너지 효율성과 주파수 효율성의 관계는 총 전력량을 단순 상수로 가정하고 있지 않고 증폭기의 IBO를 고려한 비선형성 Doherty 증폭기의 특성까지 포함하고 있기 때문에 에너지 효율성이 이상적이지 않다는 것을 보여준다. 대부분 문헌은 분석 또는 모의실험을 용이하게 하기 위하여 Rapp 모델 또는 Soft Limiter 모델이 널리 사용되나 실제 증폭기의 위상 변이 또는 메모리 효과를 고려한 환경에서 에너지 효율성에 관한 연구는 미비한 상태이다. 그리고 송출 기지국의 총 전력량은 식 (17)에서 증폭기의 특성만을 고려하여 에너지 효율을 계산하나 실제 구현 관점에서는 전원 공급 및 냉각 전력의 유동성과 안정성을 고려하여 에너지 효율을 최대화 하는 연구 역시 보고되지 않고 있다. 따라서 에너지 효율에 관한 연구는 반드시 전력 소모량의 세부 요소를 파악하고 정확한 모델링을 해야 에너지 이득을 정확하게 측정할 수 있음을 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 에너지 효율적 방송통신 시스템 설계를 위하여 에너지 소비의 대부분을 차지하는 증폭기의 특성에 관하여 소개하였다. 첫째로 트랜지스터의 기본 작동 원리를 통하여 증폭기의 종류와 증폭 효율에 대하여 다루었다. 이를 통해 기저대역 신호처리에 이용 가능한 비선형 증폭 모델과 입력 신호의 분포 특성에 관하여 논의하였다. 최종적으로 기저대역에서 사용하는 전력 모델을 이용하여 개별적으로 증폭기의 특성을 다룰 수 있다는 것을 소개하고 주파수 효율과 에너지 상관관계를 분석하여 에너지 효율을 분석할 때에는 반드시 총 전력량의 세부 요소를 고려해야 하는 것을 보였다. 향후 다양한 방송 통신 신호 모델을 에너지 효율적 관점에서 다루게 된다면 정확한 소비 모델을 이용하여 합리적인 분석을 제시하는 지표가 될 것이다.

참고 문헌(References)

- [1] C. Sum et al., "Is two-way relay more energy efficient," IEEE GLOBECOM 2011 Proceedings, Dec. 2011.
- [2] S. Tombaz et al., "Impact of backhauling power consumption on the deployment of heterogeneous mobile networks," IEEE GLOBECOM 2011 Proceedings, Dec. 2011.
- [3] G. Koutitas, "Green network planning of single frequency networks," IEEE Trans. Broadcast., vol 56, no. 4, pp. 541-550, Dec. 2010.
- [4] S. Tsugawa, et al., "Energy ITS: Another Application of Vehicular Communications," IEEE Commun. Mag., vol. 48, no. 11, pp. 120-126, Nov. 2010.
- [5] "Cognitive Radio and Cooperative strategies for power saving in multi-standard wireless devices (C2POWER)". <http://www.ict-c2power.eu/>
- [6] S. Tsugawa, et al., "Energy ITS: Another Application of Vehicular Communications," IEEE Commun. Mag., vol. 48, no. 11, pp. 120-126, Nov. 2010.
- [7] Y. Aoki et al., "High-power GaAs FETs," in High-power GaAs FET amplifiers, pp. 43-145, 1993.
- [8] J. V. DiLorenzo et al., "GaAs power MESFETs: design, fabrication and performance," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 27, no. 5, pp. 65-74, May 1979.
- [9] P. Sauiner et al., "A heterostructure FET with 75.8% power added efficiency at 10 GHz," Int. Symp. Digest, pp. 635-638, 1992.
- [10] John L. B. Walker, "Handbook of RF and microwave power amplifiers," Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2012.
- [11] R. J. Trew "SiC and GaN transistors-is there one winner for microwave power applications?," Proc. of the IEEE, vol. 90, no. 6, pp. 1032-1047, Dec. 2001.
- [12] Joung et al., "Trade off spectral and energy efficiencies: impact of power amplifier on OFDM systems," IEEE GLOBECOM, Anaheim, U.S., Dec. 2012.
- [13] M. C. Jeruchim et al., "Simulation of communication systems: modeling, methodology, and techniques," Springer, 2000.
- [14] A. A. M. Saleh, "Frequency-independent and frequency-dependent non-linear models of TWT amplifiers," IEEE Trans. Commun., vol. 29, pp. 1715-1720, Nov. 1981.
- [15] A. Ghorbani et al., "The effect of solid state power amplifiers (SSPAs) nonlinearities on MPSK and M-QAM signal transmission," In Proc. Inter. Conf. Digital Processing of Signals in Communications, Loughborough, UK, Sep. 1991.
- [16] C. Rapp, "Effects of HPA-nonlinearity on a 4-DPSWOFDM signal for a digital sound broadcasting system," In Proc. Second European Conference on Satellite Communications. Liège, Belgium, Oct. 1991.
- [17] J. Tellado et al., "Maximum-likelihood detection of nonlinearly distorted multicarrier symbols by iterative decoding," IEEE Trans. Commun., vol. 51, pp. 218-228, Feb. 2003.
- [18] O. Arnold et al., "Power consumption modeling of different base station types in heterogeneous cellular networks," In Proc. IEEE Future Network and Mobile Summit 2010, Florence, Italy, Jun. 2010.

저 자 소 개



한 재 신

- 2011년 2월 : 건국대학교 전자공학과 학사
- 2011년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석, 박사 통합과정
- 주관심분야 : 디지털 전송 시스템



전 성 호

- 2005년 8월 : 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 공학학사
- 2007년 2월 : 연세대학교 일반대학원 전기전자공학과 공학석사
- 2007년 3월 ~ 현재 : KBS 기술연구소 주임연구원
- 2011년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 일반대학원 전기전자공학과 박사과정
- 주관심분야 : UHDTV 지상파 전송시스템, MIMO-OFDM 전송 기술



최 정 민

- 2010년 2월 : 서울과학기술대학교 공과대학 전자정보공학과 공학학사
- 2012년 8월 : 연세대학교 일반대학원 전기전자공학과 공학석사
- 2012년 9월 ~ 현재 : 연세대학교 일반대학원 전기전자공학과 박사과정
- 주관심분야 : 디지털 전송 시스템



서 종 수

- 1975년 : 연세대학교 전자공학과 공학학사
- 1983년 : University of Ottawa, Canada 전기공학과 공학석사
- 1998년 : University of Ottawa, Canada 전기공학과 공학박사
- 1975년 ~ 1981년 : LG 정밀 중앙연구소
- 1987년 ~ 1989년 : IDC, Canada 책임연구원
- 1990년 ~ 1992년 : 삼성종합기술원 정보 시스템 연구소 수석연구원
- 1992년 ~ 1995년 : CAL, Canada 책임연구원
- 1995년 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
- 주관심분야 : 디지털 방송/통신 시스템, 디지털 전송 방식, OFDM, CDMA