

전력증폭기 부정합 조건에서의 출력 전력 불확도 산출에 관한 연구

Study for the Uncertainty Estimation of Output Power under the Mismatch Condition of Power Amplifiers

이 가 람 · 박 영 철

Garam Lee · Youngcheol Park

요 약

본 논문은 전력 증폭기의 출력 전력 측정에 있어 드레인에서의 부정합 정도를 고려한 정교한 측정 불확도 산출 방안을 제시하였다. 기존의 측정 불확도 산출 방법은 최적 성능을 위해 의도적인 부정합을 포함하는 전력증폭기의 정합상황을 정확히 반영하는데 한계를 가지고 있다. 이를 보완하기 위하여, 전력증폭기 드레인의 부정합 정도를 포함하는 복합 반사계수와 S-파라미터 측정 불확도를 활용한 종합적인 전력 측정 불확도를 제안하였으며, 3.7 GHz에서 동작하는 10 watt급 전력증폭기의 출력 전력을 측정된 실제 결과와 비교해 보았다. 결과적으로 제안한 합성 측정 불확도는 기존 불확도에 대비하여 10배 정도의 정교한 출력 전력의 불확도를 얻을 수 있었다.

Abstract

In this paper, an accurate method to estimate the measurement uncertainty of a power amplifier was proposed. Because power amplifiers incorporate mismatch at the drain for the optimal performance, the general method is not enough to produce precise measurement uncertainty of the output power. In order to supplement this method, We suggest comprehensive power measurement uncertainty which is utilized by a complex reflection coefficient and measurement uncertainty of S-parameter which contain the mismatch at the drain on the power amplifier. After that, we compared it with real measurement results of the 10 watt power amplifier which operates on 3.7 GHz. As a result, suggested measurement uncertainty could obtain the uncertainty of output power near 10 times accurate in comparison with existing uncertainty calculation method.

Key words: Uncertainty, Power Amplifier, Propagation of Uncertainty

I. 서 론

차세대 무선통신 기기의 수요에 부응하여 정밀한 무선 통신 장치를 효율적으로 생산 및 테스트하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이때의 테스트 시간과 정확성은 제품 생산성에 직접적인 영향을 미치게 되며, 그 중

전력증폭기는 상대적으로 높은 출력을 담당하는 부품이기에, 설계 및 제조상의 문제로 인한 불확도가 시스템의 고속 대량 생산 시 부정확한 합격/불합격 판정에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 그러나 일반적인 무선시스템과 달리 의도적인 부정합 조건이 형성되는 전력증폭기의 경우, 측정 불확도를 정확하게 예측하기가 매우 어

「이 연구는 2014학년도 한국외국어대학교 교내 연구비의 지원에 의하여 이루어졌음.」

한국외국어대학교 전자정보공학과(Department of Electronics and Information Engineering, Hankuk University of Foreign Studies)

· Manuscript received June 30, 2014 ; Revised August 11, 2014 ; Accepted August 14, 2014. (ID No. 20140630-05S)

· Corresponding Author: Youngcheol Park (e-mail: ycpark@hufs.ac.kr)

려운 상황이며, 이에 대한 연구 또한 거의 이루어지고 있지 않은 상황이다^[1]. 따라서 본 논문에서는 전력증폭기 시스템에서의 신호 전달과정에서 드레인에서의 부정합도가 출력 전력의 측정 불확도에 미치는 영향에 대해 이론적인 해석을 활용하였으며, 이를 통하여 출력 전력 측정시 정교한 불확도 산출 방안을 제시하였다. 또한 실험을 통하여 제시된 방법의 결과를 비교, 분석하였다.

II. 전력증폭기 측정 불확도의 중요성

측정 불확도(Measurement Uncertainty: MU)란, 특정 시스템의 운용 및 측정에 있어서 주어진 조건 하에 예상되는 오차의 범위 및 이의 제시 절차를 의미한다^[2]. 전력증폭기 측정 불확도의 경우, 증폭기의 출력 포트에서 측정되거나 수신되는 전력이 중심 값을 기준으로 불규칙적으로 변화하는 정도를 확률적인 신뢰 수준으로 표현하며, 이 중 부정합으로 인한 영향은 50 %로 대부분을 차지한다^{[1],[3]}. 전력 증폭기의 부하 측정항목로 방향의 임피던스를 Z_L , 트랜지스터의 드레인의 출력 임피던스를 Z_G 라고 지정하였을 때 간단한 회로는 그림 1과 같다.

일반적으로 전력증폭기에서는 효율과 출력 전력을 최대화하기 위하여 최적화된 임피던스 Z_{opt} 를 설정한다^[4].

이 때 부하 임피던스 Z_L 가 Z_{opt} 일 경우, 임피던스 Z_G 가 Z_{opt} 에 공액 복소 정합되어 있지 않기 때문에 ($Z_G \neq Z_{opt}^*$) 증폭기의 출력 신호가 부정합 정도에 따라 반사되며, 이는 측정 불확도에 직접적인 영향을 미치게 된다.

따라서 전력증폭기의 출력 전력에서의 측정 불확도는 드레인과 출력 정합 회로간의 부정합 정도와 회로의 입력과 출력관계를 정의하는 S-파라미터 불확도에 의한 영향에 따라 최종 출력 전력의 오차 범위가 달라진다. 또한,

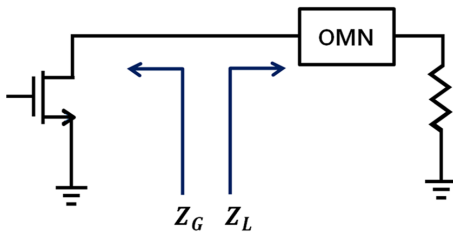


그림 1. 임피던스 Z_G 와 Z_L 에 관한 회로
Fig. 1. Simplified circuit for Z_G and Z_L .

높은 출력 전력을 가지는 전력증폭기의 경우, 출력 전력을 측정하는데 있어서 측정값의 산포 범위를 예측하는 것은 상당히 중요하다고 할 수 있다. 일례로 출력 전력이 40 dBm이고, 측정 불확도가 ± 0.1 dB이라고 가정하였을 때, 최대 2 watt의 오차가 생길 정도로 측정 불확도를 무시하기 어려운 수준이 된다.

III. 기존 불확도와 합성 측정 불확도 제시

3-1 기존의 측정 불확도 산출 방식

전력증폭기에서 신호의 전달 과정은 그림 2에서와 같이 Signal flow graph를 활용하여 도식화 할 수 있다^{[5],[6]}.

이를 주어진 S-파라미터로 도식화 하여 다음과 같은 신호의 전달계수 H 를 얻을 수 있다.

$$H = \frac{S_{21,TR}}{1 - S_{22,OMN} \times \Gamma_S} \times \frac{1}{1 - S_{22,TR} \times S_{11,OMN}} \times \frac{S_{21,OMN}}{1 - S_{22,OMN} \times \Gamma_R} \quad (1)$$

여기서, $S_{ij,TR}$ 은 그림 2에서 트랜지스터의 S_{ij} 을, $S_{ij,OMN}$ 은 출력 정합 회로의 S_{ij} 를 나타낸다.

또한 Γ_R 은 부하의 반사계수를, Γ_S 는 신호원의 반사계수를 나타낸다.

위 식을 바탕으로 입력 신호의 전달에 주로 영향을 미치는 트랜지스터의 드레인과 출력 정합 회로에 의한 영향의 최대, 최소의 범위를 살펴보면 다음과 같다.

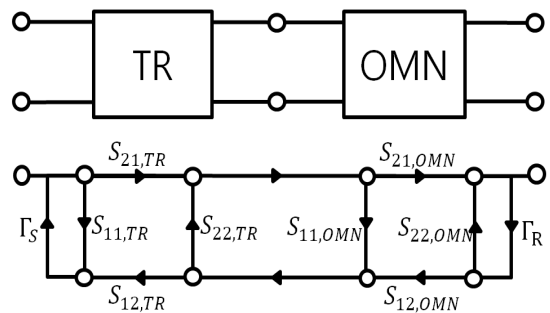


그림 2. 전력증폭기 출력단에서의 신호흐름도
Fig. 2. Signal flow graph at the output network of power amplifier.

$$\frac{1}{1 + |S_{11, OMN}| |S_{22, TR}|} \leq |H| \leq \frac{1}{1 - |S_{11, OMN}| |S_{22, TR}|} \quad (2)$$

위 식으로부터 전달계수 H 의 최대와 최소 사이의 범위를 구하여 식 (3)과 같이 변화 범위를 표현할 수 있다.

$$|H|_{\max} - |H|_{\min} \propto |S_{11, OMN}| \times |S_{22, TR}| \quad (3)$$

따라서 출력에서의 측정 불확도는 전달함수의 최대값과 최소값 분포를 따른다고 가정할 수 있으며, 여기에 Γ 의 위상 분포를 고려할 경우, 일반적으로 다음 수식과 같이 계산된다³⁾.

$$MU(\text{dB}) = 10 \times \log \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} |\Gamma_{g, \max}| \times |\Gamma_{l, \max}| \right)^2 \quad (4)$$

그러나 위 식은 각각 50 Ω을 기준으로 측정된 반사계수를 기반으로 하기에 Γ_g 와 Γ_l 간의 부정합 정도를 감안하지 못하는 오류가 존재하여 전력증폭기의 출력단에서의 정교한 측정 불확도를 제시하기가 어려운 상황이다. 따라서 본 논문에서는 좀 더 정확한 불확도 산출을 위하여 전력 증폭기의 출력 임피던스와 출력단의 부정합 정도와 S-파라미터 측정 불확도를 반영하여 3-2절에 합성 측정 불확도 산출 방안을 제시하였다.

3-2 정교한 측정 불확도 산출 방안 제시

전력증폭기의 보다 정교한 측정 불확도를 제시하고자 3-2-1절의 S-파라미터 측정 불확도와 3-2-2절의 드레인에서의 Z_G 와 Z_L 간의 정합 정도를 반영한 복합 측정 불확도를 산출하여 그림 3과 같이 RSS(Root-Sum-Square) 방식을 이용하여 합성해 주었다.



그림 3. 측정 불확도 주요 인자의 합성
Fig. 3. Combining measurement uncertainty by RSS method.

3-2-1 S-파라미터 측정 불확도

회로의 입력과 출력관계를 정의하는 S-파라미터의 측정시 오차가 존재하며, 이는 증폭기의 측정 불확도 산출에 영향을 미친다. 때문에 전력증폭기의 측정 불확도를 보다 정확하게 산출하려면 S-파라미터의 불확도를 고려해 주어야 한다.

그림 2에서 신호원과 부하의 반사계수인 Γ_S 와 Γ_R 가 0이라는 이상적인 조건을 가정할 경우, 이에 따라 식 (1)을 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$|H|_{\min} = \frac{|S_{21, TR}| \times (1 - \alpha) \times |S_{21, OMN}| \times (1 - \alpha)}{1 - |S_{22, TR}| \times (1 - \alpha) \times |S_{11, OMN}| \times (1 - \alpha)} \quad (5)$$

$$|H|_{\max} = \frac{|S_{21, TR}| \times (1 + \alpha) \times |S_{21, OMN}| \times (1 + \alpha)}{1 - |S_{22, TR}| \times (1 + \alpha) \times |S_{11, OMN}| \times (1 + \alpha)} \quad (6)$$

여기에서 α 는 트랜지스터와 출력 정합 네트워크의 S-파라미터의 측정 시 발생하는 불확도이다.

3-2-2 복합 측정 불확도

측정 불확도가 신호의 반사에 의해 생성되는 현상임을 감안할 때 식 (4)에서 제시된 불확도 수치는 Z_L 혹은 Z_G 의 개별적인 50 Ω 정합 정도만 반영되므로, 트랜지스터 드레인에서 Z_G 와 Z_L 간의 정합 정도는 표현해 줄 수 없는 한계를 가지게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 부정합 수준은 임피던스 Z_G 와 Z_L 의 관계를 정규화된 유클리디안 거리 \mathfrak{D} 로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathfrak{D} = \frac{\|Z_G - Z_L\|}{\|Z_G + Z_L\|} \quad (7)$$

위에서 제시된 임피던스 간의 정규화된 유클리디안 거리는 드레인 임피던스와 부하 임피던스의 정합 정도를 나타내주는 복합반사계수 Γ_{comp} 로 표현될 수 있다.

$$\Gamma_{comp} = \frac{Z_L - Z_G}{Z_L + Z_G} \quad (8)$$

제시된 복합 반사계수는 50 Ω과의 정합 정도가 아닌

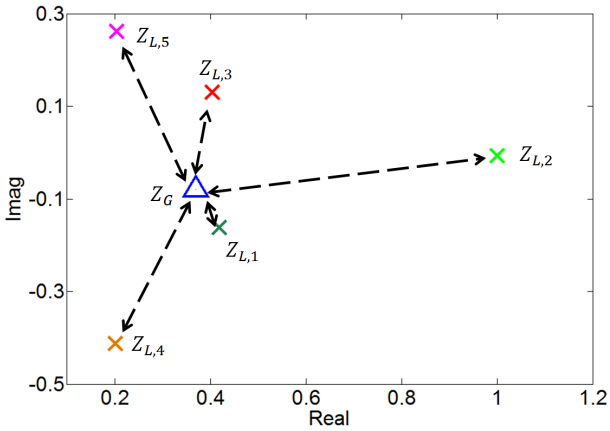


그림 4. 증폭기 부하 임피던스 Z_L 과 Z_G 간의 유클리디안 거리
 Fig. 4. Euclidean impedance distance between Z_L and Z_G at the transistor output.

표 1 불확도 산출을 위한 부하 임피던스
 Table 1. Load impedances for the analysis of measurement uncertainty.

Z_L	$Z_{L,1}$	$Z_{L,2}$	$Z_{L,3}$	$Z_{L,4}$	$Z_{L,5}$
	0.42	1.0	0.40	0.2	0.2
	$-j0.16$	$-j0.0$	$+j0.13$	$-j0.41$	$+j0.26$

드레인 임피던스 Z_G 와의 정합 정도를 표현해준다. 또한, 그림 4에 표 1과 같은 5가지 경우의 부하 임피던스 Z_L 에 대해 Z_G 와 Z_L 의 부정합 정도를 유클리디안 평면에 표현하여 도식화 하였다.

따라서 수식으로부터 구한 Γ_{comp} 를 이용할 경우, 복합 측정 불확도는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$MU_{comp}(\text{dB}) = 10 \times \log(1 + |\Gamma_{comp}|^2) \quad (9)$$

3-2-3 최종 측정 불확도 산출

위에서 제시된 두 가지의 불확도를 활용하여, 전력증폭기 출력 전력의 불확도는 최종적으로 RSS 방식으로 합성하여 식 (10)과 같이 산출할 수 있다.

$$MU_{RSS} = \sqrt{MU_{s-para}^2 + MU_{comp}^2} \quad (10)$$

여기서 MU_{s-para} 는 S-파라미터의 측정 불확도, MU_{comp}

는 복합 반사계수에 의해 산출된 측정 불확도를 나타내며, 최종적으로 합성된 MU_{RSS} 는 전력증폭기 출력 전력의 불확도 주요 인자 두 가지를 모두 반영한다.

IV. 측정 및 분석

앞서 제시된 측정 불확도의 유효성을 확인하기 위해 상용 10 W급 RF Power GaN HEMT CGH40010를 사용한 CREE사의 Test Board를 사용하여 3.7 GHz에서 출력 전력을 측정하였다. CGH40010은 6 GHz까지의 범위에서 동작하며, 4 GHz에서 약 14 dB의 소신호 이득을 갖고 65 %의 효율을 보인다^[7]. 이러한 test board를 활용하여 output단에 연결한 tuner를 이용하여 출력 임피던스 Z_L 을 그림 5와 같이 변화시켜가며 10회씩 측정하여 실제 측정 불확도를 산출하였다. 이를 기준으로 두고 제안하는 측정 불확도와 일반적인 측정 불확도의 값을 비교하였다.

4-1 최종 합성 측정 불확도 산출

전력증폭기의 입출력 S-파라미터를 측정하여 1- σ 분포 수준의 측정 불확도를 산출하고, 이를 2배하여 95 % 신뢰수준을 갖는 2- σ 분포 수준의 측정 불확도를 산출하였다. 그 결과, 출력 전력에 직접적으로 영향을 미치는 트랜지스터와 출력 정합회로 S_{21} 의 불확도를 표 2에 나타내었다.

앞서 설명된 $Z_{L,1} \sim Z_{L,5}$ 에 대하여 제시된 식 (8)의 복합 반사계수 값을 이용하여 복합 측정 불확도를 산출한 결과는 표 2에서 확인할 수 있다.

3-2-1절의 S-파라미터에 의한 측정 불확도와 3-2-2절의 복합 측정 불확도에 의한 값을 모두 고려해 주어, 식 (10)

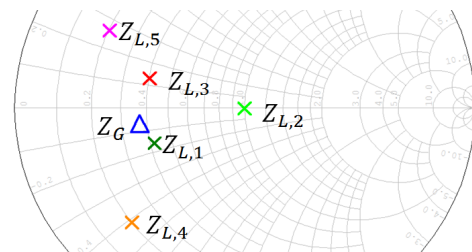


그림 5. 부하 임피던스와 드레인 임피던스의 측정 위치
 Fig. 5. Measurement points of Z_G and Z_L .

표 2. 제안된 측정 불확도 산출 항목과 복합 측정 불확도(dB)

Table 2. Measurement uncertainty from suggested composite reflection coefficient(dB).

측정 불확도(dB)	$Z_{L,1}$	$Z_{L,2}$	$Z_{L,3}$	$Z_{L,4}$	$Z_{L,5}$
S-파라미터 측정 불확도	0.039	0.042	0.047	0.017	0.022
복합 측정 불확도	0.077	0.166	0.234	0.382	0.392
최종 합성 측정 불확도	0.086	0.171	0.235	0.382	0.393

의 RSS 방식으로 계산해준 최종 합성 측정 불확도 값을 표 2에 나타내었다.

4-2 기존 측정 불확도 산출 및 분석

앞의 3-1절에서 나온 바와 같이 기존의 방식으로 Γ_g 와 Γ_l 의 위상을 반영한 식 (4)을 활용하여 표 1에 나타난 5개의 부하 임피던스 위치에서 기존 방식의 측정 불확도를 예상한 값을 표 3에 나타내어 실제 측정결과와 제안된 최종 합성 불확도 값과 비교해 보았다.

그림 6은 복합 반사계수의 크기에 따라 측정 불확도의 변화를 나타낸 그래프이며, 복합 반사계수의 크기가 증가함에 따라 측정 불확도 값이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 전력증폭기 출력단에서의 임피던스 부정합 정도에 따라 불확도 값이 증가한다는 것을 의미한다.

최종적으로 S-파라미터의 측정 불확도와 부정합에 의

표 3. 증폭기 부하 임피던스 Z_L 에 따른 측정 불확도값 비교

Table 3. Comparison of MU at different load impedances.

측정 불확도(dB)	$Z_{L,1}$	$Z_{L,2}$	$Z_{L,3}$	$Z_{L,4}$	$Z_{L,5}$
실제 측정 불확도	0.201	0.168	0.127	0.209	0.201
기존 방식 측정 불확도	1.533	1.599	1.567	2.340	2.354
제안된 최종 합성 측정 불확도	0.086	0.171	0.235	0.382	0.393

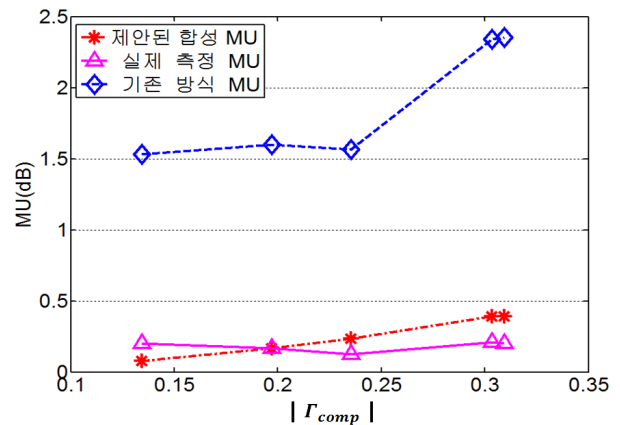


그림 6. 부하 임피던스에 따른 복합 반사계수 및 측정 불확도 비교

Fig. 6. Comparison of MU between different MU estimation methods.

한 복합 불확도 값을 RSS 방식으로 산출하였고, 그에 따른 최종 합성 측정 불확도와 기존의 방식으로 구한 측정 불확도 중에 어느 방법이 실제 측정 결과와 유사한 수치를 나타내는지 확인하였다.

그림 6을 통해 합성 측정 불확도 값이 기존의 불확도 값보다 실제 측정 결과와 근접한 것을 볼 수 있으며, 각 측정 위치에서의 측정 불확도 값의 평균을 내어 이를 표 4에 수치로 나타내었다.

표 4에서 나타난 바와 같이 측정 결과를 기준으로 기존의 불확도와 산출된 합성 측정 불확도를 비교해 보면 오차가 1.704 dB에서 0.060 dB로 감소하였다.

결과적으로, 전력증폭기의 출력 전력 측정 시 제안된 합성 측정 불확도 방식을 이용할 경우, 기존에 비해 10배 정도의 정확도를 갖는 불확도 값을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

표 4. 측정 불확도 실측 결과와 산출 결과 평균 비교
Table 4. Comparison of measurement uncertainty results.

	MU (dB)	MU 오차(dB)
실제 측정 불확도	0.195	—
기존 방식 측정 불확도	1.899	1.704
제안된 측정 불확도	0.255	0.060

V. 결 론

본 논문은 전력증폭기의 측정 불확도 예측에 있어, 증폭기의 드레인에서의 부정합 정도를 고려한 정교한 측정 불확도 산출방안을 제시하였다. 제시된 방법은 복합 반사계수와 S-파라미터 측정 불확도를 모두 반영한 합성 불확도로 실제 측정 불확도 값과 비교하였을 때 0.060 dB의 오차를 보임으로써 기존의 출력 불확도와의 오차인 1.704 dB에 비해 훨씬 근사한 값을 나타내는 것을 확인하였다. 결과적으로, 전력 증폭기의 측정 불확도는 출력 전력에 직접적으로 영향을 미치는 드레인에서의 부정합 정도와 S-파라미터의 불확도를 모두 고려하는 합성 불확도 방법으로, 이를 이용하여 보다 정교한 측정 불확도 값을 산출할 수 있음을 확인하였다.

References

[1] 박영철, 윤회진, "F급 전력증폭기의 출력 전력 불확

도에 대한 DC 영향 분석 및 최적 바이어스 조건 도출에 관한 연구", 한국전자파학회논문지, 25(2), pp. 183-188, 2014년 2월.

- [2] Ronald H. Dieck, *Measurement Uncertainty Methods and Applications*, ISA, 2007.
- [3] Agilent, "Fundamentals of RF and microwave power measurements", *Agilent Technologies, Inc. 2011 Printed in USA April 5, 5988-9215EN*, 2011.
- [4] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, 1999.
- [5] Guillermo Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, Prentice Hall, 1997.
- [6] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison Wesley, 1990.
- [7] Cree Inc., *Application Note for CGH40010 Evaluation Board*.

이 가 람



2013년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)
 2013년~현재: 한국외국어대학교 전자정보공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계, RF Power Amplifier, 측정 불확도 분석

박 영 철



1992년 2월: 연세대학교 (공학사)
 1994년~2000년: 삼성전자 정보통신 총괄 선임연구원
 2004년 7월: Georgia Inst. Tech. (공학박사)
 2004년~2007년: 삼성전자 정보통신 총괄 책임연구원
 2007년 3월~현재: 한국외국어대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] 전력증폭기 설계, 디지털 무선 신호처리, 무선 측정시스템 불확도 해석, mmWave 통신 시스템 설계