

IQ 변조기의 EVM 성능 최적화

이 글에서는 벡터 신호 분석기를 이용해서 LTC5598 같은 IQ 변조기의 EVM 성능을 최적화하는 것에 대해서 설명한다. LTC5598은 5MHz~1600MHz 고-선형성 직접 직각(90°) 위상의 변조기 IC이다.

글/Bruce Hemp, Senior Applications Engineer,
Peter Stroet, Design Engineer,
Linear Technology

EVM(error vector magnitude)은 디지털 변조 정확도를 나타내는 스칼라 값으로서, 디지털 변조 성능을 나타내는 중요한 지수 중의 하나이다. 이 글에서는 벡터 신호 분석기를 이용해서 LTC5598 같은 IQ 변조기의 EVM 성능을 최적화하는 것에 대해서 설명한다. LTC5598은 5MHz~1600MHz 고-선형성 직접 직각(90°) 위상의 변조기 IC이다.

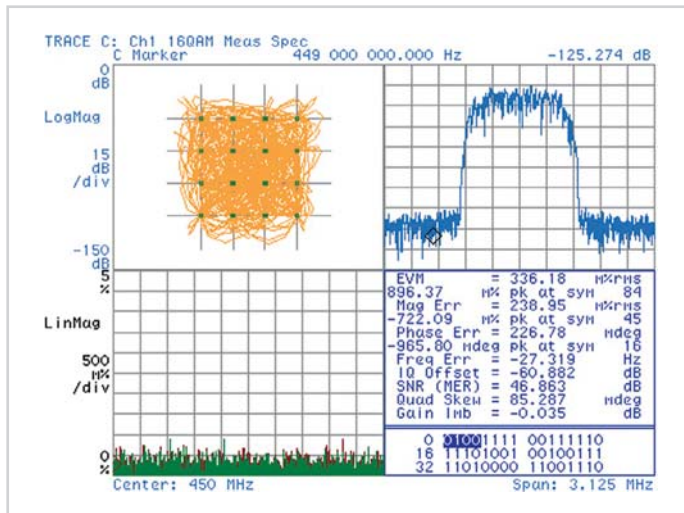
변조기 EVM은 낮을수록 바람직하다. EVM은 라인을

따라서 내려갈수록 더욱 더 악화되기 때문이다. 업컨버터, 필터, 전력 증폭기, 통신 채널, 리시버 모두가 수신 신호를 더욱 악화시킨다.

테스트 셋업

특별히 언급하지 않은 한, 다음과 같은 테스트 조건을 적용한 것이다(그림 3 참조):

그림 1. 450MHz EVM 측정 결과가 0.34% RMS라는 것을 알 수 있다. 비교를 위해서, 고성능 시험용 신호 발생기는 동일한 VSA 셋업을 이용해서 EVM이 0.28% RMS인 것으로 측정된다.



- Linear Technology의 DC1455A 데모 회로 상의 LTC5598 IQ 변조기 IC
- LO: 0dBm, f=450MHz
- 기저대 변조(Baseband Modulation): PN9, root raised cosine(RRC) filtering, $\alpha=0.35$, symbol rate=1Msps, 16-QAM (four bits per symbol, peak-to-average ratio 5.4dB)
- 기저대 구동(Baseband Drive): V_{EMP} (참조 1) 0.8V differential(1.15V_{p-p} differential), $V_{BIAS}=0.5V$
- VSA 측정 필터: RRC, $\alpha=0.35$
- VSA 레퍼런스 필터: Root Cosine(RC)

16-QAM은 비교적 널리 이용되는 디지털 변조 방식으로서, LTC5598을 이용해서 달성할 수 있는 변조 정확도를 쉽게 파악할 수 있게 한다. 이 변조 방식은 LTE/LTE-Advanced, HSDPA, EDGE Evo, CDMA2000 EV-DO, Cognitive Radio IEEE 802.22(TV 화이트 스페이스), PHS, TETRA 등의 다수의 무선 통신 표준에 사용되고 있다.

LTC5598의 EVM 테스트 결과

그림 1에서는 LO = 450MHz일 때 EVM 측정을 보여준다. LTC5598은 EVM이 0.34% rms 및 0.9% peak라는 것을 알 수 있다. 고조파 필터를 거친 후에 출력 전력은 동일한 신호로 +0.4 dBm인 것으로 측정된다. 비교를 위해서, 시험소용 신호 발생기는 동일한 VSA 셋업을 이용해서 동일한 진폭, 주파수, 디지털 변조로 0.28% rms와 0.8% peak인 것으로 측정된다. 이것을 보면 LTC5598의 변조 정확도가 이를 측정하기 위해서 이용되는 테스트 장비와 거의 맞먹을 만큼 우수하다는 것을 알 수 있다.

IQ 구동 레벨에 따른 EVM

- 16-QAM, 1Msps, RRC, raised cosine, $\alpha = 0.35$ (peak-to-average ratio 5.4dB)
- $V_{BIAS} = 0.5V$ DC. LO=0dBm

그림 4에서는 기저대 입력이 변조기 출력 신호를 피크로 구동하면서 압축 지점에 도달함에 따라서 EVM이 급격히 상승하는 것을 알 수 있다. VSA를 이용해서 EVM을 측정하지 않더라도 이 최대 rms 출력 전력 지점을 다음과 같이 계산할 수 있다:

+8.4dBm LTC5598 Output P1dB
(Typ. at $f_{RF} = 450MHz$)
-5.4dB Crest Factor of 16-QAM Test Waveform

= +3.0dBm Average Output Power
(피크는 1dB 압축 지점이 될 것이다.)

다만 이 방법은 대략적인 계산이다. 아주 복잡한 변조 방식일 경우에는 1dB 압축도 과도할 수 있고 동시에 파고율(crest factor)도 더 높아짐으로써 극히 복잡한 파형

그림 2. VSA의 기본 원리. 측정 신호와 이상적으로 복원시킨 레퍼런스 신호를 비교한다.

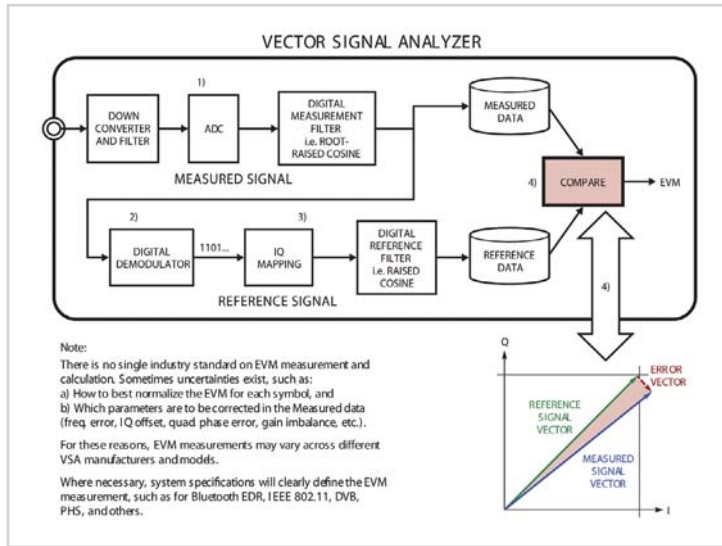
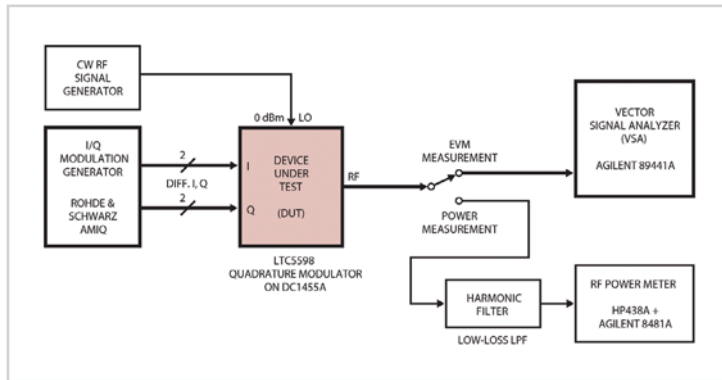


그림 3. EVM 테스트 셋업. 저역통과 고조파 필터가 주로 흡수차인 출력 고조파를 제거함으로써 정확한 출력 전력 측정을 달성한다.



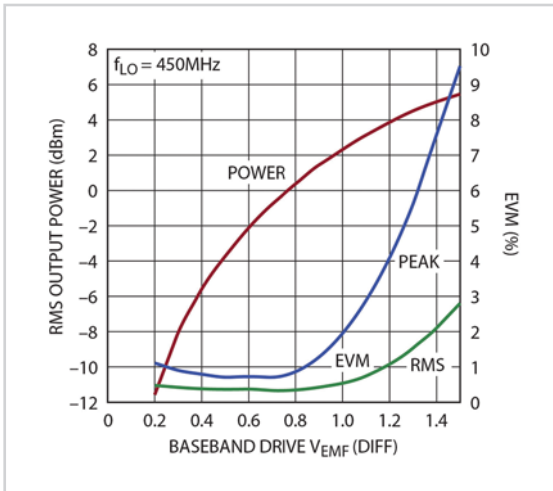
의 경우에는 이용할 수 있는 평균 전력 출력을 크게 저하시킬 수 있다.

LO 주파수에 따른 EVM

아래와 같이 동일한 테스트 조건을 적용한다:

16-QAM, 1Msps, RRC, raised cosine,

그림 4. IQ 구동 레벨에 따른 EVM과 RMS 출력 전력



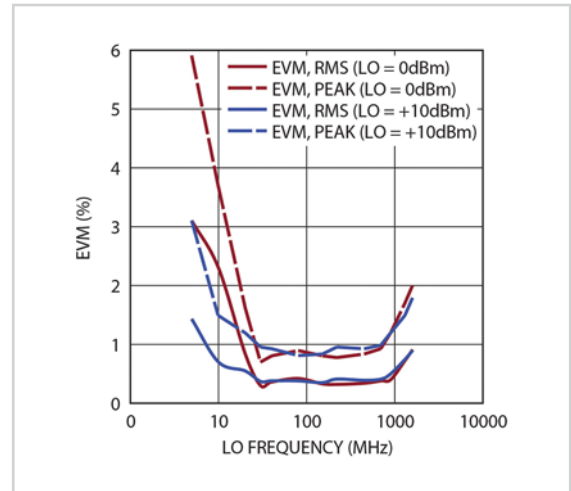
$$\alpha = 0.35(\text{peak-to-average ratio } 5.4\text{dB})$$

$$V_{EMF} = 0.8\text{V differential}(1.15V_{P-P} \text{ differential}),$$

$$V_{BIAS} = 0.5\text{V}$$

그림 5에서는 LTC5598의 변조 정확도가 이 IQ 변조기 주파수 범위의 양쪽 끝에 다다를수록 어떻게 영향을 받

그림 5. LTC5598의 LO 주파수에 따른 EVM. 낮은 LO 주파수일 때는 더 높은 LO 구동 전력과 기저대에서 직각 위상 오차 교정을 이용함으로써 EVM을 향상시킬 수 있다.



VSA와 EVM의 개요

변조 정확도는 통상적으로 벡터 신호 분석기(Vector Signal Analyzer)를 이용해서 측정한다(그림 2). 개요적으로 말해서 VSA는 다음과 같이 작동한다:

- 1 입력 신호를 특정한 대역에 걸쳐서 지정된 중심 주파수로 하향변환(Down convert)하고 디지털화한다. 변조 방식, 심볼 레이트, 측정 필터 등을 사용자가 선택할 수 있다. 이 데이터가 '측정 신호'가 된다.
- 2 측정 신호를 디지털적으로 복조해서 소스 디지털 데이터 스트림을 복원한다.
- 3 복원된 소스 데이터, 변조 방식 등에 근거해서 VSA가 수학적으로 이상적인 '레퍼런스' 신호를 발생시킨다.
- 4 측정 신호와 레퍼런스 데이터 벡터 사이의 차이를 계산해서 오차 벡터를 계산하고 피크 신호 레벨로 정규화한다. 오차 벡터 셋으로부터 rms와 피크 EVM 스칼라 값을 도출한다.

IQ 변조기 EVM을 최소화하기 위한 도움말

'깨끗한(clean)' IQ 기저대 소스를 이용한다:

- IQ DAC 클럭이 위상 잡음과 지터가 낮아야 한다.
- DAC 복원 필터가 기저대 대역으로 방해하지 않도록 해야 한다.
- 기저대 IQ 신호 경로가 주파수 응답이 충분히 평탄해야 한다.

'깨끗한(clean)' LO 신호 소스를 이용한다:

- LO 위상 잡음은 랜덤 위상 오차를 증가시킴으로써 EVM을 증가시킨다. 이 오차는 나중에 가서 제거하기 어렵다.
- LO 고조파는 직각 위상 오차를 발생시킨다. 최상의 성능을 달성하기 위해서는 변조기 데이터 시트에서의 LO 고조파 성분에 관한 권장사항들을 준수하는 것이 바람직하다.

표 1. LTC5598의 직각 위상 오차 및 이득 불일치 오차(LO 구동=0dBm). 측대역 억제는 이 둘의 집합적 효과이다.

LO FREQUENCY (MHz)	QUADRATURE PHASE ERROR (DEG.)	IQ GAIN IMBALANCE (dB)	SIDEBAND SUPPRESSION (dB)
5	4.3	0.14	28
10	3.6	0.01	30
20	1.2	0.02	40
40	-0.3	0.03	50
1600	-1.2	0.05	39


는지 알 수 있다. 30MHz에서 700MHz까지 중간 구간의 주파수 대역에서 EVM이 가장 낮다는 것을 알 수 있다. LO 주파수가 30MHz 미만일 때는 더 강한 LO 구동을 이용함으로써 EVM을 낮출 수 있다(이에 관해서는 LTC5598 데이터 시트 참조).

LO 주파수 범위의 양쪽 끝에서 LTC5598의 EVM을 야기하는 가장 주된 요인은 표 1에서 보는 것과 같이 직각 위상의 위상 오차(IQ사이의 위상오차)이다. IQ 이득 불일치도 일부 존재하기는 하지만 대체적으로는 전반적인 EVM에 그렇게 크게 기여하는 요인은 아니다. 필요하다면 기저대에서 개방 루프를 이용하거나 또는 일부 전송 체인에서는 기존 폐쇄 루프 PA 전치왜곡 교정 시스템의 일부로서 이들 오차 요인 중의 어느 한 쪽 또는 둘 다를 교정할

수 있을 것이다.

시스템에 따라서는 다소 높은 EVM이라도 하더라도 별 문제 없이 허용할 수 있을 것이다. 예를 들어 단순한 저차수 디지털 변조 방식을 이용할 때이다.

요약

LTC5598은 다수의 널리 이용되는 VHF 및 UHF 통신 대역으로 뛰어난 디지털 변조 정확도를 달성한다. 경우에 따라서는 시험소용 신호 발생기에 거의 맞먹는 수준의 EVM을 달성하기도 한다. 필요하다면 직각 위상 또는 이득에 대한 기저대 교정을 이용해서 정확도를 향상시킬 수 있다. 

[참조 1]

V_{EMF} 는 Rohde & Schwarz AMIQ 소프트웨어에서 설명하고 있는 바와 같이 차동 IQ 기저대 진폭이다. 실제적인 I 및 Q 전압(peak-to-peak differential)은 그림 3에서 보는 것과 같다.

[참조 2]

전치왜곡 교정은 이 글의 범위를 벗어나는 주제이므로 또 다른 글에서 논의해야 할 것이다. 다만 이 글에서는, 전치왜곡은 자체적인 리시버를 이용하므로 송신 EVM을 효과적으로 측정할 수 있고 기저대 파형에 따라서 적응적으로 교정을 함으로써 오차를 최소화할 수 있다는 것만 알아두면 될 것이다. 전치왜곡은 오차가 어디서부터 비롯된 것인지(변조기인지, PA인지, 아니면 둘 다인지) 알지 못하고 상관하지도 않는다.

