

디지털 광대역 마이크로 웨이브 수신기에서의 선형 증폭기와 ADC 접속의 해석

이민혁, 장은영, 박지연, 박재운, 변건식
동아대학교 전자공학과

Analysis of the linear Amplifier/Analog-Digital Converter Interface in a Digital Microwave Wideband Receiver

Min Hyouck Lee, Eun Young Chang, Ji Eon Park, Jae Woon Park, Kun Sik Byon
Dept. of Electronics Dong-a University
ksbyon@seunghak.donga.ac.kr

Abstract

An analysis of the relationship between a linear amplifier chain and an analog-to-digital converter (ADC) in a digital microwave wideband receiver, with respect to sensitivity and dynamic range issues, is presented. The effects of gain, third-order intermodulation products and ADC characteristics on the performance of the receiver are illustrated and design criteria for the linear amplifier chain given a specified ADC are developed. A computer program is used to calculate theoretical receiver performance based on gain and third-order intermodulation product selections. Simulated results are also presented and compared with theoretical values.

I. 서론

광대역 전자전과 경찰용의 가장 최근의 디지털 광대역 마이크로 웨이브 수신기는 ADC 속도와 동적범위의 제한, 그리고 처리율등과 같은 하드웨어 제한으로 실제로는 아직 존재하지 않지만 이 두 분야에서의 꾸준한 접근으로 디지털 수신기 개념이 더욱 실제화되고 있다.

전자전 디지털 마이크로 웨이브 수신기에서의 순시 대역폭은 수십 MHz에서 1GHz이상이며 중심 주파수가 GHz인

신호는 그 주파수가 다운되어 ADC로 디지털화된다. 디지털화된 데이터는 고속 디지털 신호 처리기로 전달되어 스펙트럼 추정과 같은 연산이 FFT를 통해 수행된다. 디지털 수신기에서의 ADC 한계(즉 bit수, 샘플률등)는 감도와 동적범위를 구하는데 중요한 역할을 한다. 이러한 경우 ADC는 RF단의 일부로 고려되어진다.

본 논문에서는 ADC가 먼저 선택된후 원하는 감도와 동적범위를 얻기위해 증폭기 chain을 설계한다고 가정한다. 물론 감도와 동적범위의 관계는 trade off가 이루어 지는데 즉 감도가 클수록 동적범위는 낮아진다. 이득과 3차 상호 변조점은 적절한 감도와 동적범위를 얻도록 결정되어진다.

본론에서는 먼저 증폭기와 ADC 특성을 제시하고 종합적인 성능을 결정하기위한 식들이 제시된다. 또한 설계 예를 설명하여 컴퓨터 프로그램에 의해 생성된 성능 결과를 표로 나타낸다. 마지막으로 실험적 결과를 보이며 이는 이론값과 비교된다.

II. 본론

1. 증폭기와 ADC 특성

각 소자의 뚜렷한 특징에 따른 증폭기/ADC 접속과 디지털 신호 처리 구성도가 그림1에 나타나있다. 이들 소자는 디지털 수신기의 RF/IF down-conversion 뒷단에 연결된다.

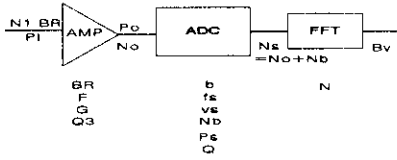


그림1. 전체 시스템 구성도

증폭기 chain을 특성화하는 관계를 설명하면 입력 전력 P_i 와 3차 상호 변조점 Q_3 사이의 관계는

$$P_3 = 3[(P_i + G) - \frac{2}{3} Q_3] \text{ dBm} \quad (1)$$

이다. 이 관계는 그림2로부터 구해진다. 대역폭이 B_R 인 증폭기의 출력 잡음 전력은 다음과 같다.

$$N_o = N_i + F + G + B_R \text{ dBm} \quad (2)$$

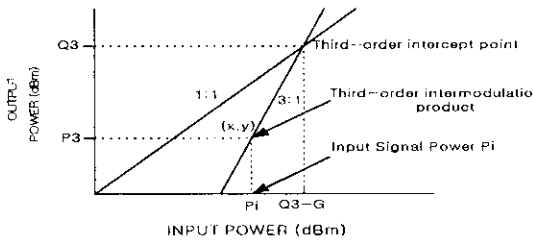


그림2. 3차 상호 변조점

다음으로 ADC와 처리 대역폭을 특성화한다. 한 개의 양자화 레벨을 Q 로 하고 시스템 저항이 R 이며 ADC의 입력이 정현파로 구성된다고 할 때 양자화 잡음 전력과 full scale 입력 sine파에 의해 생성된 전력과의 비는

$$\frac{P_s}{N_b} = \frac{2^{2(b-1)} Q^2}{12R} = \frac{3}{2} 2^{2b} \text{ 이다. 이 식을 log 형태로 쓰}$$

면 $P_s = 1.76 + N_b + 6b \text{ dBm}$ 이다.

같은 video 또는 처리 대역폭 B_v 를 정의한다. 만약 샘플링 주파수가 f_s 이고 FFT의 총 수가 N 이며 시간 영역 창함수가 구형이라면 처리 대역폭은 $B_v = \frac{f_s}{N}$ 이 된다.

3차 상호 변조점 P_3 가 B_v 내 잡음 레벨보다 작다면 동적범위는 잡음으로 제한되며 반대로 P_3 가 B_v 내 잡음 레벨보다 크다면 동적범위는 P_3 로 제한된다. 만약 P_3 가 B_v 내 잡음 레벨과 같다면 최적조건이 얻어진다. 이러한 관점에서 증폭기와 ADC는 그림3과 같이 연결될 수 있다. ADC의 입력 잡음은 N_o 이고 출력 잡음은 입력 잡음과 양자화 잡음 N_b 의 합이 된다. N_o 와 N_b 의 관계는 $N_o = MN_b$ W 이고 log 형태는 $M = N_o - N_b \text{ dB}$ 이다. 시

스템의 총 잡음은 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$N_s = N_o + N_b = N_o + \frac{1}{M} N_o = \frac{M+1}{M} N_o = \frac{M}{M} N_o \quad (3)$$

또는 $N_s = N_o + M - M \text{ dBm}$

여기서 $M = M + 1$ 이다.

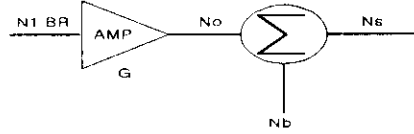


그림3. 증폭기/ADC 잡음 성분

증폭기에 잡음이 존재하는 경우 ADC의 포화를 피하기 위해 허용할 수 있는 최대 입력 신호 전력이 감소되어야 하는데 이를 허용하기 위해 최대 전력은 잡음 전력 N_o 의 3차 표준 편차만큼 감소되어진다. ADC 입력에서 최대 입력 진폭에 대응되는 감소분은 $V_m = \sqrt{3N_o R}$ 이며 잡음 성분을 포함하는 최대 전력은 $P_m = \frac{[2^{b-1} Q - V_m]^2}{2R} \text{ W}$ 이다. 이 식과 식(3)을 사용해서 구한 수신기 잡음 지수는 다음과 같다.

$$F_s = \frac{N_s}{GN_i B_R} = \frac{M N_o}{MGN_i B_R} = \frac{M}{M} F \quad (4)$$

또는 $F_s = F + M - M \text{ dB}$

이 식에서 M 의 값이 클수록 수신기 잡음 지수는 덜 열화됨을 알 수 있다. M 이 증가할 때 F_s 는 증폭기 잡음 지수 F 에 근접한다. 이 의미는 증폭기 출력에서의 잡음 전력은 양호한 감도를 이루기 위해 양자화 잡음 전력과 비교해서 상대적으로 커야 함을 의미한다.

시스템의 필요이득을 구하기 위해 증폭기 입력단에서 진폭이 같은 두 개의 정현 신호를 생각한다. 증폭기의 출력은 ADC 입력 동적범위에 정합되어야 한다. 위 조건 하에서 각 신호의 진폭은 포화를 피하기 위하여 ADC 입력에서 full scale 전력 레벨보다 6dB 아래에 있어야 한다. 이 관계는 $(P_i + 6) + G = P_m \text{ dBm}$ 이다.

P_i 에 의해 생성된 3차 상호 변조점 P_3 는 처리 대역폭 내 잡음 레벨에 정합된다. 잡음 레벨이 $N_b B_v / B_R$ 이므로 $P_3 = N_i + G + F + B_v + M - M \text{ dBm}$ 이 된다. 이 식은 식(2)와 식(3)에서 얻어졌으며 여기에 식(1)을 조합하고 식(1)에 P_i 를 P_i 로 대치하면 $Q_3 = \frac{3P_i - N_i + 2G - F - B_v - M + M}{2} \text{ dBm}$ 이다. 이는 잡음 레벨과 정합되기 위한 Q_3 의 필요한 최소값이다. 결론적으로 동적범위는 $DR = (P_i + G) - P_3 \text{ dB}$ 이 된다.

2. 설계 예

여기서는 위에서 정의된 수식들을 MATLAB으로 구현

하여 그 성능 결과를 제시한다. 프로그램의 출력은 이득, 3차 상호 변조적, 잡음지수, 그리고 동적범위이다. 이 예에서 RF단의 규격은 $B_n=30\text{MHz}$, $F=3.3\text{dB}$ 이며, ADC의 규격은 $b=8\text{비트}$, $P_s=-1.3\text{dBm}$, $f_s=250\text{MHz}$, 그리고 저항 $=50\Omega$ 이다. 또 FFT 연산은 1024점을 하였다. 표1은 프로그램의 결과이며 이득이 증가 할 때 시스템 잡음 지수는 식(4)에서 지정한대로 증폭기 chain의 잡음 지수에 근접한다. 수신기 설계자는 표1을 사용하여 5열과 6열에서 감도와 동적범위에 대한 희망 동작점을 선택한다. 2열은 이 동작점에 대한 필요이득을 주며 3열은 최소 허용값 Q_3 를 준다.

3. 실험 및 검토

(1) Setup

ADC 앞단의 증폭기 chain을 만들기 위해 2개의 증폭기가 사용되었다. 처음 증폭기는 이득 42dB, 잡음지수 3.3dB, Q_3 는 12dBm이며 두 번째 증폭기는 이득 29dB, 잡음지수 4dB, Q_3 는 33dBm이다. 표1을 통해 이득이 71dB일 때 잡음 지수는 3.3dB, 필요한 최소 Q_3 는 9.6dBm, 동적범위는 36dB가 된다. 동적범위를 52dB로 개선하려면 잡음지수는 0.26dB만큼 열화되어야 한다. 52dB의 동적범위 조건하에서 수신기의 이득은 약 57dB, 필요한 최소 Q_3 는 약 18.5dBm으로 설정되어야 하며 이러한 이득을 얻기 위해 14dB의 감쇠기가 증폭기 chain에 삽입되어야 한다. 두 증폭기를 연결하는 방법에는 감쇠기를 두 증폭기 사이에 넣는 방법이 있고 감쇠기를 두 번째 증폭기 다음에 넣는 방법이 있다. 위에 주어진 증폭기 파라미터를 사용하면 이들 두 방법에 대한 증폭기 chain의 잡음지수와 Q_3 가 계산될 수 있다. 이 결과가 표2이다. 일반적으로는 첫 번째의 경우가 사용이 되어질 것이다. 두 번째 경우는 3차 상호 변조점이 필요로하는 최소한의 값을 겨우 만족한다. 하지만 이 예에서는 일반적인 경우와 달리 두 번째의 경우가 사용이 될 것이다. 첫 번째 경우는 3차 상호 변조점이 잡음 레벨보다 낮아 보이지 않을 것이다.

(2) 동적범위 측정

증폭기에 두 개의 신호를 주입하고 이 증폭기를 통과한 신호는 ADC를 통과하게 된다. 여기서 얻어진 데이터로부터 동적범위를 측정하는 것이다. 신호의 주파수는 각각 36MHz와 41MHz이다. 표1의 결과와 비교를 하기 위해 증폭기는 57dB의 이득에서 시작된다. 이 이득에서 Q_3 는 약 18dBm으로 측정되었다. 처음 200개의 샘플에 대한 디지털 데이터 그림이 그림4에 보인다. 두 신호의 전력 레벨은 -7.3dBm으로 주었다.

다음의 스펙트럼 그림(5(a), 5(b), 5(c))에서 최적과 준 최적 조건을 설명하기 위하여 3개의 다른 값(Q_3 값이

+15, +18, +21dBm 인 54, 57, 60dB 이득)을 사용한 결과를

표1. 계산된 RF단의 성능

M	G	Q3(↑)	P3	Fs(↓)	DR
0.25	38.78	24.41	-71.06	10.29	63.64
0.5	41.79	24.02	-70.27	8.07	62.86
1	44.80	23.38	-69.02	6.31	61.60
2	47.81	22.46	-67.26	5.06	59.81
4	50.82	21.31	-65.04	4.27	57.57
8	53.83	19.97	-62.49	3.81	54.97
16	56.84	18.51	-59.72	3.56	52.15
32	59.85	16.94	-56.84	3.43	49.19
64	62.86	15.29	-53.90	3.37	46.13
128	65.87	13.54	-50.92	3.33	42.98
256	68.88	11.68	-47.93	3.32	39.74
512	71.89	9.63	-44.93	3.31	36.37

표2. 두 가지 방법으로 종속 접속된 증폭기의 결과 값

METHOD	G	F	Q_3
1	57	3.3	26.0
2	57	3.3	18.4

보인다. 그림5(a)는 54dB의 이득에 대한 스펙트럼이다. 이 결과는 1024점 FFT 진폭 스펙트럼을 5번 실험하여 평균한 것이다. 3차 상호 변조적이 31MHz와 46MHz에서 나타난다. 그림에서 알수 있듯이 3차 상호 변조적이 -62.2dBm으로 측정된 잡음바닥 위에 분명히 나타나고 있다.

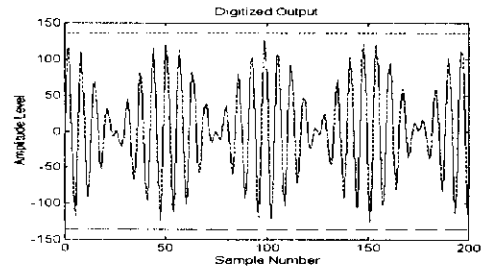


그림4. 같은 진폭을 지닌 두 신호의 시간 영역 그림

이 이득값에서 P_3 는 B_n 내 잡음보다 더 크며 동적범위는 31MHz(-56.4dBm)에서의 3차 상호 변조적과 두 입력 신호 전력(-7.3dBm)사이의 차 혹은 49.1dB로 제한된다. 그림 5(b)에서는 잡음 바닥이 -58.6dBm으로 측정되었다. 이 그림에서 3차 상호 변조적은 잡음 바닥과 구분할 수 없다. 따라서 잡음바닥이 제한 요소이며 동적범위는 표1에서의 값에 거의 가까운 51.3dB이다. 그림5(c)에서도 3

차 상호 변조적은 분간되지 않고 잡음바닥은 -55.2dBm으로 측정되었다. 이 경우 동적범위는 약 47.9dB이다. 57dB 이득의 경우에 3차 상호 변조적이 잡음 바닥과 얼마나 가까이 정합되는가의 정량적 척도를 얻기 위하여 ADC의 입력 전력을 0.5dB만큼 증가시켜 포화되도록 하였다. 결과적인 스펙트럼은 그림6과 같다. 그림에서 3차적을 분명히 볼 수 있다. 만약 P_3 가 잡음바닥 아래에 뚜렷이 있다면 더 높은 포화의 양이 3차 상호 변조적을 얻기위하여 필요하게 될 것이다.

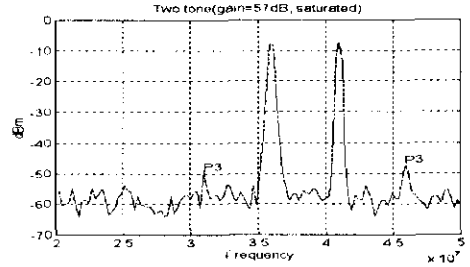


그림6. 최대 입력 레벨을 넘어서 출력 스펙트럼 gain=57dB

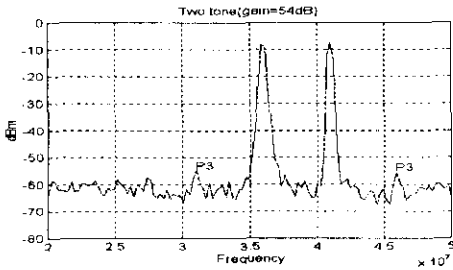


그림5 (a). 출력 스펙트럼 gain=54dB

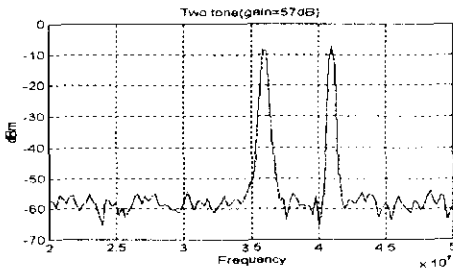


그림5 (b). 출력 스펙트럼 gain=57dB

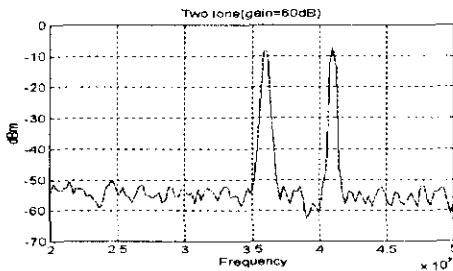


그림5 (c). 출력 스펙트럼 gain=60dB

III. 결론

본 논문은 감도와 동적범위를 관련시키기 위해, 디지털 광대역 마이크로 웨이브 수신기에서의 선형 증폭기와 ADC사이의 관계를 해석하였다. 해석 결과 디지털 수신기 성능에 대해서 이득, 3차 상호변조적, 그리고 ADC 특성의 효과를 알아 보았다. video 대역폭 내에서 3차 상호 변조적을 잡음바닥과 같게 제한함으로써, 원하는 감도와 동적범위를 얻기 위하여 증폭기 chain을 설계하는 식이 유도되었다. 설계 예에서 데이터표(표1)를 만드는 프로그램이 사용되었으며 이 표에서 증폭기 chain의 Q_3 와 이득을 얻기 위한 방법이 제시되었다. 특별한 증폭기 chain과 ADC를 사용한 실험 결과가 이론적 성능 값을 확고히 하기 위해 사용되었다.

참고문헌

- [1] James Tsui, "Digital Techniques for Wideband Receivers", Artech House, 1995.
- [2] James Tsui, "Microwave Receivers with Electronic Warfare Applications", Krieger publishing company, 1992.
- [3] Ray H. Pettit, "ECM and ECCM Techniques for Digital Communication Systems", Lifetime Learning publications, 1982.
- [4] Vinay K. Ingle, John G. Proakis, "Digital Signal Processing Using MATLAB® V.4", PWS, 1997.
- [5] Andrew Grace, Alan J. Laub, "Control System TOOLBOX - Signal Processing", The Math Works, 1993.