

마이크로 컴퓨터를 이용한 FFT 분석기의 설계 및 제작

(Design and Construction of a FFT Analyzer Using a Microcomputer)

李 賢 泰**, 金 重 圭**, 李 相 培*

(Hyeun Tae Lee, Jung Gyu Kim and Sang Bae Lee)

要 約

마이크로컴퓨터에서 연산 처리기를 사용하여 연산 처리 능력을 높이고 실시간 분석을 위한 데이터 입력 시스템을 구성하여 가청 주파수 범위에서 사용할 수 있는 FFT 분석기를 설계 및 제작하였다.

입력 신호는 전단 증폭기와 필터를 거쳐 A/D 변환되고 변환된 입력 데이터를 Apple II 마이크로컴퓨터에서 분석하였다. 분석한 결과를 마이크로 컴퓨터의 디스플레이 장치를 이용하여 표시하고, 프린터에 프린트하거나 플라피 디스켓에 저장할 수 있게 하였다.

Abstract

By improving the ability of arithmetic processing with an arithmetic processor in a microcomputer and realizing the data input system for real time analysis, an FFT analyzer that is usable within the range of audio frequency is designed and constructed. The input signal passes through a gain programmable pre-amplifier and anti-aliasing lowpass filter into an analog-digital converter to be converted into digital form. The converted input data is processed by an Apple II microcomputer. The results of the processing are displayed using a microcomputer display unit and can be copied on a printer or stored in a floppy disk.

I. 서 론

최근 20년 동안 계측분야, 특히 스펙트럼 분석에 많은 발전이 있었다. 종래의 스위프(sweep) 주파수 분석기와 같은 아날로그 분석기에서부터 마이크로프로세서에 의한 FFT 분석기나 모달(modal) 분석 시스템 등으로 발전되어 왔다.¹⁾

FFT 분석기는 전기 계측, 음향, 음성, 의용 등 광

범위한 분야에서 매우 필요한 장비이다.^{2,3,4,5)} FFT 분석기는 아날로그 분석기에 비해 높은 안정성과, 잡음이 있는 경우보다 좋은 주파수 해상도를 얻을 수 있으며 비교적 높은 다이내믹 레인지(dynamic range)를 갖는다. 특히 샘플링 주파수를 조정함으로써 매우 낮은 주파수의 분석이 용이하다.²⁾ 그런데 이러한 FFT 분석기는 매우 고가이므로 쉽게 구입할 수 없는 실정이다.

최근 몇 년 동안 소형 마이크로컴퓨터가 널리 보급됨에 따라 공학적인 목적에 그 사용이 증대되고 있다. 그리고 많은 소프트웨어가 개발되어 메인 프레임(main frame)에서 운용되던 기능을 대신할 수 있게 되었다. 그러나 마이크로컴퓨터를 이용하여 실시간 처리하기 위한 하드웨어나 소프트웨어는 미비한 실정이다.

*正會員, **準會員 延世大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Yon Sei Univ.)

接受日字: 1986年 3月 21日

(*本 論文의 研究는 1984年度 3月부터 1986年 2月까지 韓國科學財團 研究費 支援에 의해 이루어짐.)

본 논문에서는 현재 널리 사용되고 있는 마이크로컴퓨터에서 실시간 처리를 위한 입력 시스템을 구성하고 입력신호 데이터를 분석 처리하고 결과를 마이크로컴퓨터의 디스플레이 장치에 표시하고 프린트에 하드 카피(hard copy) 하거나 플라피 디스켓에 데이터를 저장할 수 있게하여 경제성 있고 확장성을 가진 분석기로서 설계하고자 한다.

II. 제작한 FFT 분석기 시스템의 구성

신호를 실시간 분석하기 위한 디지털신호 처리 방법으로 디지털 필터링 방법과 FFT에 의한 방법이 있다. 디지털 필터링 방법은 주파수 스케일이 대수적인 1/3 옥타브 분석 등에 적합하고 선형 주파수 즉, 협대역 주파수 분석에는 FFT 방법이 효율적이다.^{9,10)}

신호를 실시간으로 FFT 분석하기 위해서는 신호를 수집하는 데이터 블럭 시간보다 처리 시간이 빨라야 하며 처리하는 가운데도 데이터를 받아 들여야 실시간 처리가 가능하다.¹¹⁾

그런데 실제로 빠른 처리를 요하지만 반드시 실시간 분석을 필요로 하지 않는 경우가 있다.⁸⁾ 예를들어

- Stationary 신호의 분석
 - 천이 신호의 분석
 - 천천히 변하는 non-stationary 신호의 분석
- 등이 있다.

FFT 분석기를 마이크로컴퓨터를 이용하여 설계할 경우 다음과 같은 장점이 있다.

- 분석기 시스템 하나로 여러 기능에 사용할 수 있고 기능의 변경이 쉽다.
- 다른 분석 시스템이나 제어 시스템과 함께 자동 계측 시스템을 구성할 수 있다.
- 저렴한 가격으로 분석기를 구성할 수 있다.

그런데 마이크로컴퓨터를 이용하여 FFT 분석기를 구성할 경우 다음과 같은 제약성이 있다.

첫째로, 처리속도(execution speed)이다. 사용되는 마이크로컴퓨터의 처리속도에 의해 분석기의 처리 속도가 제한을 받게 된다. 그러나 보다 처리 속도가 빠른 마이크로컴퓨터를 사용하고 연산처리 등 많은 부분의 고속 처리를 담당할 수 있는 프로세서를 사용하면 처리 속도 문제를 해결할 수 있다.

둘째로, 처리할 데이터 메모리가 많이 필요한 분석의 경우 등에서 메모리 크기의 제약을 받는다. 그러나 이것은 프로그램 메모리로 뱅크(bank)화된 메모리 영역을 사용함으로써 충분히 많은 데이터 메모리 영역을 확보할 수 있다.

셋째로, 높은 주파수의 분석이 필요한 경우 빠른 샘플링을 제어하고 데이터를 입력할 수 있는 데이터 입력 시스템이 필요하다.

본 연구에서는 입력 신호를 이득을 가변할 수 있는 전단 증폭기와 필터를 거쳐 A/D 변환기에 의해 디지털 데이터로 변환하고 입력 데이터 버퍼 메모리에 입력된다. 입력된 데이터는 FFT 처리하거나 다른 기능 처리를 하게 된다. 연산처리 및 처리제어 그리고 디스플레이는 Apple II의 6502 기제어를 사용하여 행하고 처리 속도의 증가를 위하여 연산 처리기(arithmetic processor) Am9511A를 사용하였다. 분석한 결과는 Apple II의 디스플레이 장치를 이용하여 나타내고 분석할 데이터나 분석한 데이터를 플라피디스켓에 저장하거나 프린터에 프린트할 수 있게 하였다. 입력 신호 처리 후 신호 합성을 위하여 D/A 변환기를 사용하여 합성 신호를 출력할 수 있게 하였다.

제작한 FFT 분석기의 전체 시스템 블럭 다이어그램은 그림(1)과 같다.

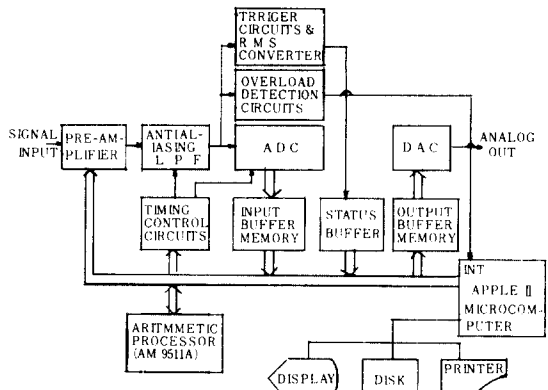


그림 1. FFT 분석기 시스템 블럭다이어그램
Fig. 1. Block diagram of FFT analyzer.

1. 신호 입력 시스템

분석하고자 하는 입력 신호는 먼저 전단 증폭기에 가해진다. 전단 증폭기는 차동 증폭기(OP-Amp)와 Multiplying D/A 변환기로 구성되어 있으며 마이크로 컴퓨터의 데이터 버스와 연결되어 있다. 이때 D/A 변환기는 Multiplying 모드로 동작하므로 출력은 아날로그 입력 신호와 입력 디지털 데이터의 곱과 같이 되며, 따라서 입력 디지털 데이터에 따라 입력신호를 0 dB에서 48dB까지 임의로 이득을 조정할 수 있다.

아날로그 입력 신호는 A/D 변환하기 전에 저역 필터를 통과시켜 주파수를 제한시켜야 하는데 이러한 역할을 하는 저역 필터를 엔티 애일리에싱(anti-aliasing) 저역 필터라 한다.

본 연구에서는 입력신호의 분석 주파수 영역을 선택하면 필터의 차단 주파수가 자동적으로 결정되도록 처리하였는데 이와 같이 하기 위해서는 능동 저역 필터를 정해진 각 제한 주파수를 갖도록 하는 필터 뱅크(filter bank)를 쓰거나 SCF(Switched Capacitor Filter)를 사용하는 방법이 있는데 여기서는 주파수 제한 특성이나 능동 필터 설계시 소자값의 선택과 감도등의 문제가 있으므로 SCF를 사용하였다.^[12]

사용한 SCF는 80dB/octave 이상의 주파수 제한 특성을 가지며 필터의 차단 주파수 f_0 는 클럭 주파수 f_{s-c} 와 $f_0=0.02422f_{s-c}$ 의 관계에 의해 결정된다.

신호를 입력하여 분석하고자 할 때 신호가 입력 시스템의 선형 범위를 넘어 쏠리거나 왜곡되면 원신호의 분석이 어려워진다. 그러므로 선형 범위를 넘은 신호가 입력되면 이를 감지하기 위해 아래 그림과 같은 과입력 감지(overload detection) 회로를 사용하였다.

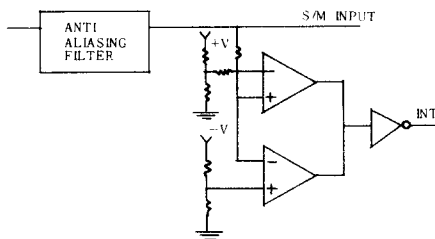


그림 2. 과 입력 감지 회로

Fig. 2. Overload detection circuit.

입력신호를 분석하고자 할 때 트리거링(triggering)은 신호의 시간축 평균(time averaging)이나 시간축 수집 모드(time capturing mode) 등에서 매우 중요하다. 트리거 원(trigger source)으로는 신호 레벨과 내부와 외부의 트리거 원이 있다. 그리고 시간축 수집 모드에서 어떤 현상(event)이 있고 분석하고자 하는 신호가 시간 간격을 두고 나타날 때, 신호 레벨에 의해 트리거된 후 트리거 점에서 이전과 이후의 분석할 데이터 레코드(record)수를 결정할 수 있게 설계하였다. 따라서 트리거 방향을 지정할 수 있도록 정트리거(positive trigger)와 부트리거(negative trigger) 기능을 두었으며 기록할 레코드수, 트리거 레벨, 트리거 방향 등은 마이크로 컴퓨터의 키 보드에 의해 입력된다. 그리고 신호 레벨에 의해 트리거 하고자 할 때 잡음이 많이 있는 경우, 특히 펄스성 잡음인 경우 잡음에 의해 트리거 될 수 있으므로 신호를 RMS(root mean square)값으로 변환한 후 정해진 레벨에 따라 트리거 하도록 하였다.

전단 증폭기를 거쳐 필터를 통한 신호가 A/D 변환기에 의해 디지털 데이터로 변환된다. 신호를 실시간(real time) FFT 분석 처리하기 위해서는 신호의 손실없이 처리되어야 한다. 그리하여 본 논문에서는 데이터 입력을 위한 버퍼 메모리를 두개 두어 한쪽 버퍼의 데이터를 처리하는 중에 다른 쪽 버퍼에 신호 데이터를 입력하여 다음 데이터 블록의 분석은 버퍼를 스위칭하여 분석할 수 있게 하였다.

그림 3은 A/D 변환기 및 입력 버퍼 시스템 구성도이다.

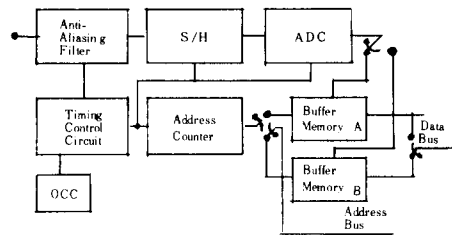


그림 3. A/D 변환기 및 입력 버퍼 시스템 구성도

Fig. 3. Block diagram of A/D converter and input buffer system.

2. 연산처리 시스템

FFT 연산의 고속 수행 즉, 실시간 처리할 수 있는 능력을 높이기 위해서는 곱셈 처리를 포함한 기본 연산처리를 빨리하여야 한다. 그런데 마이크로 컴퓨터를 이용하여 FFT 처리를 할 때 현재 시장에 나와 있는 하드웨어 곱셈기(hardware multiplier)의 속도는 충분히 빠르기 때문에 대부분의 시간은 데이터를 주고 받는 데 소비하게 된다. 그리하여 FFT 연산을 위한 전용 하드웨어를 구성하지 않고는 하드웨어 곱셈기를 사용하여 처리속도를 2배 이상 높이기가 힘들다. 이러한 이유로 본 논문에서는 스택에 의한 오퍼레이션(operation)을 하는 연산 처리기 Am9511A를 사용하였다. 사용한 연산처리기의 특성은 다음과 같다.^[13]

- 고정 소수점 16과 32비트 연산
- 부동 소수점 32비트 연산
- 사칙연산
- 삼각함수, 역 삼각함수 계산
- 고정 소수점과 부동 소수점 사이의 변환
- 스택 오퍼레이션
- DMA와 I/O 데이터 전송

이 연산 처리기는 8개의 16비트 워드(word)의 스택을 가지고 있으므로 FFT의 버터플라이(butterfly) 처리를 데이터와 명령을 차례로 줌으로 결과가 스택의 처음(top)에 있게 된다. 이와 같이 데이터가 스택

에 있는 상태로 처리됨으로 처리 시간을 줄일 수 있다. FFT 연산은 256개의 샘플된 데이터를 Radix-2, DIT(Decimation In Time) 알고리즘을 사용하여 수행하였다.

3. 그래픽 디스플레이(graphic display)

분석기의 디스플레이는 Apple II 마이크로컴퓨터의 디스플레이 장치를 사용하여 기계어로서 고속 디스플레이 프로그램을 작성하였다. 입력 신호를 분석한 뒤에 각 주파수에 대한 실효치나 전력값을 선형이나 데시벨 단위로 나타낸다. 현 커서의 위치의 주파수와 스펙트럼 값을 읽을 수 있으며 Apple II의 키로서 커서를 움직여 가며 읽을 수 있도록 하였다.

3차원 그래픽 모드에서는 진폭, 대 주파수, 시간을 3차원적으로 표시한다.

4. (제작한 FFT) 분석기의 기능 명령

1) 순시 스펙트럼(Instantaneous spectrum)

신호입력 시스템으로 입력된 데이터를 FFT 분석 처리하여 스펙트럼을 디스플레이 한다.

2) 평균 모드(Averaging mode)

신호가 랜덤 신호의 경우 스펙트럼 특성을 구하기 위해서는 각 성분에 대한 전력(power)의 평균값을 구할 필요가 있다. 그리고 결정 신호(deterministic signal)가 랜덤 잡음을 갖고 있는 경우 평균하여 잡음을 줄일 수 있다. 평균할 스펙트럼 갯수를 선택할 수 있으며 지수 평균과 침두치 모드는 중단키를 누를 때 까지 계속된다.

제작한 FFT 분석기의 평균 모드는 다음과 같다.

● 선형 평균(summation averaging)

가장 일반적인 평균 모드로 N개의 스펙트럼의 각 성분끼리 합하여 갯수 N으로 나누어 구한다.

● 지수평균(exponential averaging)

가장 최근의 스펙트럼에 대해 이전의 스펙트럼이 지수적으로 낮추어 가중치를 두어 구한다.

● 차이 모드(difference mode)

현재의 평균 스펙트럼을 새로운 스펙트럼에서 빼다. 배경 잡음이 존재하는 경우, 신호가 없을 때 배경 잡음의 평균 스펙트럼을 계산하고 현재의 스펙트럼에서 빼줌으로 배경 잡음을 억제할 수 있다.

● 침두치 모드(peak mode)

평균 모드는 아니나 스펙트럼 값중 가장 최대치를 나타내 주는 모드로 최대치가 중요한 의미를 지니는 측정에 사용된다.

3) 시간축 파형 수집모드(time capturing mode)

천이신호나, 음성과 같은 non-stationary 신호등의

분석을 위하여 처리하기 전에 분석할 신호 전체를 수집하여 메모리에 저장된다.

자동 데이터 수집을 위하여 루프(loop)형 입력 버퍼 메모리에 입력 데이터를 계속 저장하고 있다가 트리거되면 트리거 점에서 정해진 이전과 이후의 레코드수에 따라 수집한 뒤 분석하게 된다.

음성 신호등과 같은 non-stationary 신호의 분석을 위하여 신호를 stationary 한 부분으로 쪼라서 분석할 수 있도록 프레임 시간 간격을 선택할 수 있게 하였다.

4) 신호 파형 편집기능

입력 데이터 메모리의 신호 파형을 화면에 디스플레이 하며 원하는 곳의 분석을 할 수 있게 하였다.

5) 자기 상관함수(autocorrelation)

신호에서 주기 성분을 뽑아 내거나 에코(echo) 성분을 감지할 경우 등에 사용된다.

III. 실험 및 결과 고찰

실험은 푸리에 변환에 의해 주파수 스펙트럼을 쉽게 알 수 있는 정현파와 구형파를 파형발생기로 부터 입력하여 분석하였고 음성 신호를 시간축 파형 수집 모드로 입력하여 분석하였다.

그림 4은 파형발생기로 부터 입력한 정현파가 윈도우 프레임 안에 완전히 정수 주기가 들어가는 경우의 스펙트럼이고 그림 5는 정수 주기가 아닌 경우의 스펙트럼이다. 그림 6는 헤닝 윈도우(hanning window)를 사용하였을 때의 정현파 스펙트럼이다. 그림 7은 구형파 스펙트럼이다. 그림 8은 음성 파형 "아"를 5msec 시간 간격으로 스펙트럼 분석한 결과이다.

본 논문에서 제작한 FFT 분석기는 A/D 변환기를 8비트로 사용하였기 때문에 다이내믹 레인지가 48dB이하이다. 그런데 연산은 16비트 연산을 하므로 A/D 변환기 비트 수를 증가시키면 다이내믹 레인지는 증가시킬 수 있다. FFT 처리 샘플 포인트수는 Apple II의 디스플레이 장치의 표시 기능의 제한과 처리 효

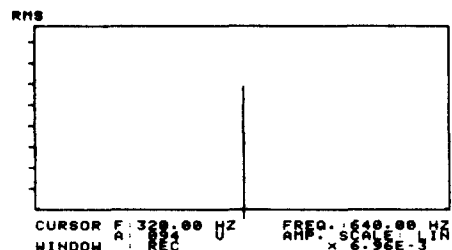


그림 4. 정현파 스펙트럼(정수주기)
Fig. 4. Sine-wave spectrum(integer period).

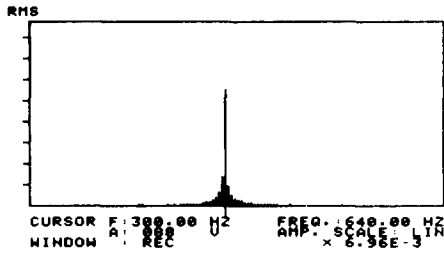


그림 5. 정현파 스펙트럼(비정수 주기)
Fig. 5. Sine-wave spectrum(non-integer period).

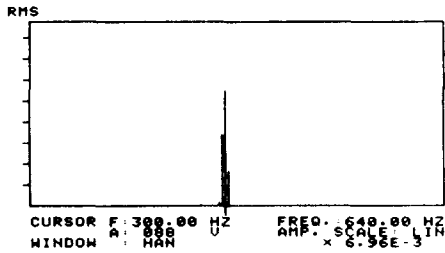


그림 6. 정현파 스펙트럼(해닝 윈도우)
Fig. 6. Sine-wave spectrum(hanning window).

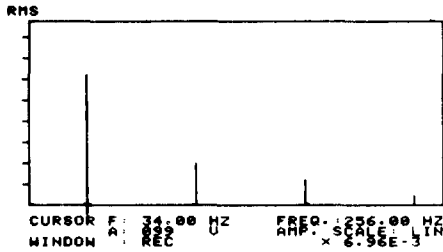


그림 7. 구형파 스펙트럼
Fig. 7. Rectangular spectrum.

을 때문에 256 포인트를 사용하였다. 디스플레이는 기존 FFT 분석기가 실시간으로 입력신호와 스펙트럼을 표시하기 위하여 분석 결과를 D/A 변환기에 의해 X, Y축 편향시키므로 디스플레이에 많은 비용이 들어가고 정확한 측정 회로의 구성이 어렵다. 본 논문에서는 AppleII의 디스플레이 장치를 사용하여 기계어로 고속 디스플레이 프로그램을 작성하여 입력 신호의 실시간 디스플레이는 불가능하지만 스펙트럼은 실시간 디스플레이가 가능하였다.

16비트 고정 소수점 연산에 의해 256 포인트 FFT를 수행하였을 때 약 300msec가 소요되었고 디스플레이 과정에서 약 50msec가 소요되었다.

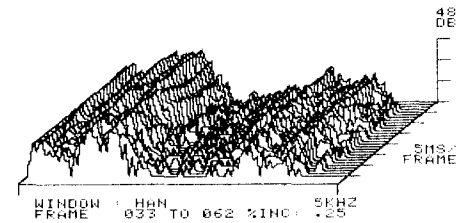
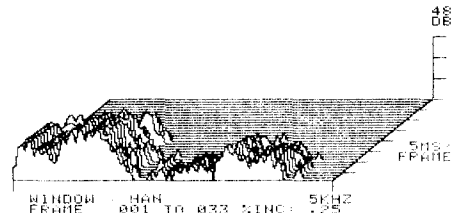


그림 8. 음성파형 "아"의 스펙트럼
Fig. 8. Spectrum of voice signal "ah".

IV. 결 론

본 연구에서는 마이크로컴퓨터에서 연산 처리기를 사용하여 연산처리 능력을 높이고 실시간 분석을 위한 데이터 입력 시스템을 구성하여 가칭 주파수 범위에서 사용할 수 있는 FFT 분석기를 설계하였다.

입력 버퍼를 두개 두어 데이터 입력과 분석을 동시에 하여 300Hz 정도까지 실시간 분석이 가능하였다.

분석 결과는 실시간으로 관찰 가능하게 표시할 수 있었고 진폭, 주파수, 시간을 3 차원으로 표시하였다.

제작한 FFT 분석기는 실시간 처리 능력이 다소 떨어지지만 마이크로컴퓨터의 처리 속도가 증가되고 연산 처리의 많은 부분을 담당할 수 있는 고속 프로세서를 사용하면 음향이나 음성 처리 등에서 충분히 실시간 분석이 가능할 것이다.

제작한 FFT 분석기는 모듈화된 프로그램으로 구성되어 있으므로 독립된 분석기로서 뿐만아니라 다른 분석 시스템이나 제어 시스템과 합쳐 분석 시스템이나 제어 시스템을 구성할 수 있다.

마이크로컴퓨터의 터미널 기능을 이용하여 메인 컴퓨터로의 신호의 입, 출력 터미널로 사용할 수 있을 것이다.

참 考 文 献

[1] "Versatile Instrument Simplifies Dynamic Signal Analysis at Low Frequencies" Hewlett-Packard Journal, December 1984.
[2] Henry J.Bickel, "Is this what my spectrum

- really looks like? An illustrated guide to better spectrum really looks like?", Proceedings of The Technical Program, Noisexpo, National Noise and Vibration Control Conference, New York, N.Y. March 1976.
- [3] "Qualitative Evaluation of Automotive D.C Motors". Wavetek Application Note 5. september 1972.
- [4] 이근구, "기계 진동 측정을 위한 데이터 처리시스템 설계" 연세대학교 대학원, 1985.
- [5] "New Instrumentation Techniques Accurately Predict Bearing Life", Wavetek Application Note 16. July 1981.
- [6] Rabinar, L.R. and Gold, B. Theory and Application of Digital Signal Processing, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. 1975.
- [7] Brigham, E.O., The Fast Fourier Transform, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. 1974.
- [8] Thrane, N. "The Discrete Fourier Transform and FFT Analyzers" B&K Technical Review, no 1. 1979.
- [9] Randall, R.B. and Upton, R., "Digital Filters and FFT Technique in Real-Time Analysis" B&K Technical Review, no. 1 1978.
- [10] 한진하, "마이크로컴퓨터를 이용한 주파수 분석기의 설계 및 제작" 연세대학교 대학원, 1984.
- [11] R.B. Randall, B.Tech., B.A., Application of B&K Equipment to Frequency Analysis, September 1977.
- [12] Daniel C Von Grunigen, Rainer Sigg, Michael Ludwig, Urs, W.B. RUGGER, "Integrated Switched-Capacitor Low Pass Filter with Combined Antialiasing Decimation Filter for Low Frequency" IEEE. Journal of Solid-State Circuits, December 1982.
- [13] "Algorithm Details for the Am 9511A APU" AMD Application Brief.
-