2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

존슨 노이즈 온도계측기 개발을 위한 규칙성 EMI 잡음신호 제거방법

Elimination of Noise Peak for Signal Processing in Johnson Noise Thermometry Development

황인구, 문병수, 정종은, 조윤호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

Roger A Kisner
Oak Ridge National Laboratory
Bethel Valley Road, Oak Ridge, TN 37831, USA

요 약

존슨 노이즈 온도계를 개발하기 위해서는 고감도 미세신호를 증폭하여야 하나 이 신호를 증폭하는 전자회로의 내부 및 외부로부터 간섭되어 생기는 존슨 신호가 아닌 간섭 잡음을 제거해야 하는 어려움이 있다. 한국원자력연구소와 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)이 공동으로 개발하고 있는 존슨 노이즈 온도계측시스템은 증폭기의 내부 잡음은 두 채널간의 CPSD(Cross Power Spectral Density)함수를 이용하여 제거한다. 한편 외부로 들어오는 공통모드 전자기파 간섭잡음은 주파수 스펙트럼상의 높이 차이를 사용하여 분리한다. 이 때 이 신호의 분리 기준을 설정하는 것이 중요하다. 이 논문은 표준편차를 이용하는 스펙트럼상에 나타나는 공통모드 신호의 제거 논리방법과 그 실험 결과를 기술한다.

Abstract

The internal and external noise is the most considering obstacle in development of Johnson Noise Thermometry system. This paper addresses an external noise elimination issue of the Johnson Noise Thermometry system which is underway of development in collaboration between KAERI and ORNL. Although internal random noise is canceled by Cross Power Spectral Density function, a continuous wave penetrating into the electronic circuit is eliminated by the difference of peaks between Johnson signal and external noise. The elimination logic using standard deviation of CPSD and energy leakage problem in discrete CPSD function are discussed in this paper

1. 온도측정 시스템

존슨 노이즈 혹은 금속류의 열잡음은 전자(conduction electron)의 온도에너지에 의한 불규칙 운동(statistical random motion)에 의해 다음의 식(1)과 식(2)로 표현되는 기전력이 발생한다. [1-8].

$$\overline{e_n^2} \approx 4kTR \quad [V^2/Hz] \text{ ---------- (1)}$$

$$\overline{i_n^2} = 4kT\tfrac{1}{R} \quad [A^2/Hz] \text{ -- ---------- (2)}$$

여기서 k 는 볼츠만 상수(1.68 x 10^{-23} [Joule/K], R 은 저항값, 그리고 T 는 절대온도이다. 위의 (1)과 (2)식으로부터 3 개의 파라미터(개방 전압 e_n^2, 단락 전류 i_n^2, 도체의 저항 R)중 두 가지가 측정되면 절대 온도 T 를 알 수있다. 개방전압과 단락전류를 동시에 정확히 측정하는 것이 전자회로의 구성상 쉽지 않으므로 존슨 노이즈 온도 측정 시스템은 저항치 R 과 전압신호(e_n^2)의 두 파라미터를 측정하여 절대온도를 산출하는 방식을 택하였다. 여기서 개방전압을 측정하기위해서는 전압측정기가 필요한데 실제의 전압 측정기는 측정기의 증폭도와 수신대역폭이 존재하므로 측정되는 신호의 크기는 식(1)은

$$\overline{v_s^2(t)} = 4kTR \times \Delta f \times G_{amp} \left[V^2\right] \text{ ---------- (3)}$$

이 된다. 여기서 Δf 는 수신기의 대역폭, G_{amp} 는 수신기의 측정이득이다.

개발되는 시스템의 구성은 센서부, 전단증폭기부, 수신부, 신호처리부로 구성된다. 센서는 기존의 RTD(Resistance Temperature Detector) 센서를 이용한다. 그림 1 은 구성도를 계통도로 표현한 것이다. RTD 는 온도의 변화에 따라 저항이 변동되므로 매 순간마다 이 저항치를 측정하여 존슨 노이즈 온도를 계산하는데 활용한다. 절대온도와 센서의 저항치에 비례하여 존슨 노이즈가 발생되나 이 잡음의 크기는 수십 마이크로 볼트 수준의 작은 값이므로 매우 높은 증폭이득을 가진 고감도 전단증폭기(Pre-Amplifier) 회로가 필요하다. 고감도 증폭기는 입력으로 들어오는 존슨 노이즈뿐만 아니라 증폭회로 내부의 각종 잡음도 같이 증폭하게 되므로 이 내부잡음을 제거하지 않으면 존슨 노이즈 신호를 제대로 추출할 수 없다. 이 내부 잡음은 넓은 주파수 대역에 걸쳐 산재하므로 일반적인 주파수 영역 필터를 사용하는 것은 효과적이지 못하다. 두 개의 독립적인 증폭회로를 구성하고 존슨 노이즈 신호를 두 개의 채널에서 공통으로 증폭하면 각 채널의 내부에서 발생되는 잡음신호는 서로 독립적이라고 볼 수 있으므로 Cross Correlation Function 을 사용하면 이 독립적인 신호는 제거되고 상호 공통신호인 존슨 노이즈의 크기만 추출할 수 있다. 시간영역에서의 Cross Correlation 은 주파수 영역에서의 Cross Power Spectral Density(CPSD)와 대응되므로 디지털 프리에 변환(DFT: Digital Fourier Transform)과 이의 공액복소수 적산(Conjugate Multiplication)을 이용하여 CPSD 를 산출하여 존슨 노이즈 신호만을 추출한다. 이 CPSD 의 확률적 평균치와 센서의 저항치 R, 그리고 볼츠만 상수, 주파수 대역 정보를 이용하여 절대온도를 계산한다.

이 논문은 CPSD 에도 불구하고 두 채널에 공통으로 영향을 크게 주게되는 외부의 전자기파 신호의 제거방법에 대하여 고찰한다.

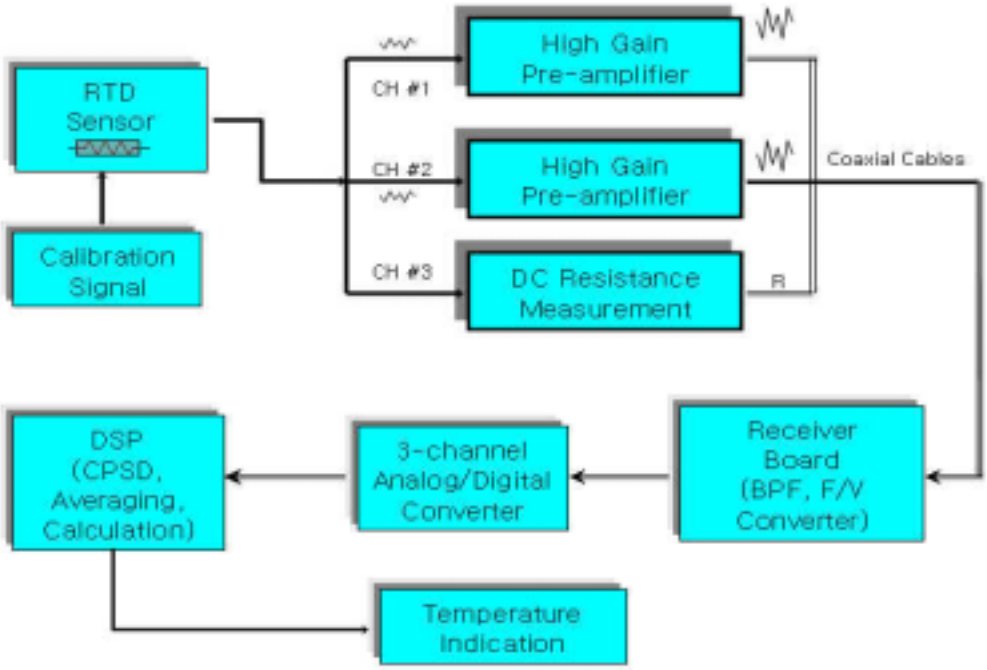
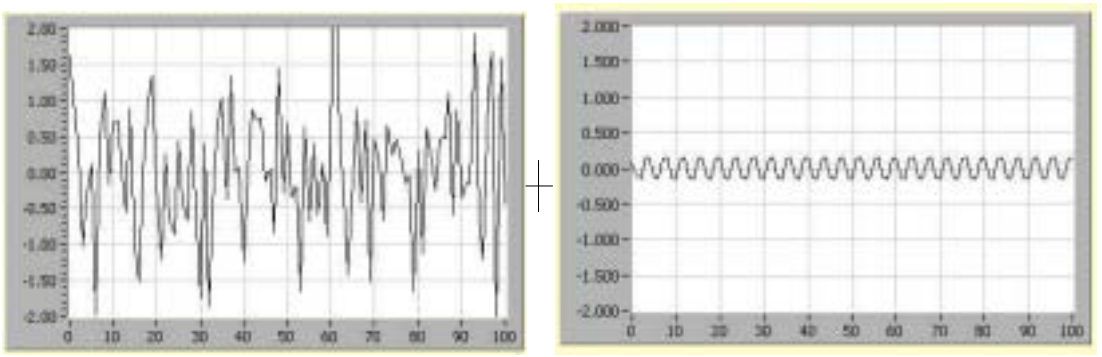


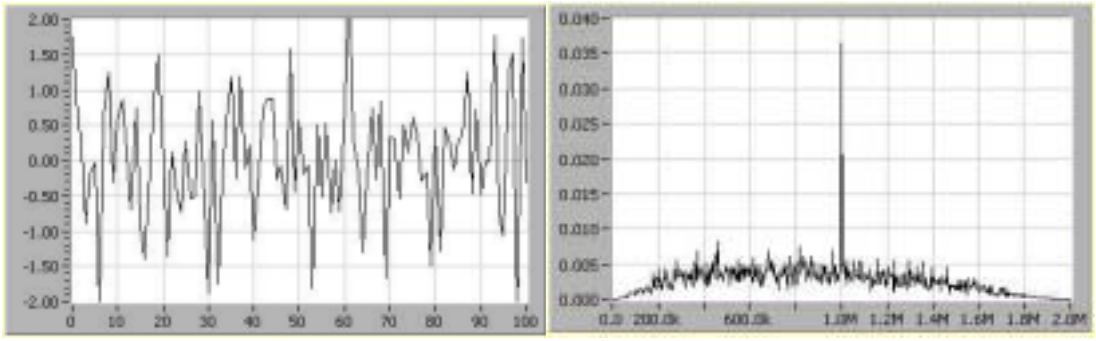
그림 1. 존슨 노이즈 온도 측정 시스템의 구성도

2. 공통 EMI(Electromagnetic Interference) 신호 제거

외부에서 유입되는 공통모드의 전자기파 간섭신호는 두개의 채널과 그에 대한 CPSD 의기능으로는 제거되지 않는다. 외부의 간섭신호는 대개 일정한 주파수 성분을 가지고 있으므로 CPSD 스펙트럽 상에서 매우 높고 좁은 피크를 나타낸다. 그림 2 는 순수한 존슨 노이즈에 연속정현파 EMI 신호가 합하여 진 시간영역에서의 파형과 그것의 파워스펙트럼을 표시한 것이다. 순수 존슨신호에 그림과 같은 연속형 EMI 간섭이 일어나더라도 시간영역에서는 간섭신호의 유입여부를 판별하거나 구분하기 매우 어렵다. 그러나 그림 2 에 나타난 그 혼합신호의 주파수영역에서의 파워스펙트럼에서는 외부에서 입력된 EMI 간섭신호의 peak 를 쉽게 구분할 수있다. EMI 신호의 시간영역에서의 크기는 존슨 노이즈 신호의 평균적 크기, 1.0 의 20%에 불과 하지만 주파수영역으로 변환하면 존슨 신호는 넓은 주파수 대역을 가지고 있으므로 모든 주파수 성분으로 퍼져서 에너지가 낮은 값으로 표현되고 연속형 EMI 신호는 한 두 주파수점에 모아지게 되므로 에너지의 크기가 존슨 신호의 해당 주파수영역에서의 값보다 훨씬 크게 표시된다. 시간영역에서는 구분되기 어려운 작은 간섭 신호를 주파수 영역에서는 쉽게 찾아낼 수 있는 이유가 여기에 있다.



존슨신호 연속형 EMI 간섭 잡음



합성신호(시간영역) 합성신호(주파수영역)

그림 2. 존슨노이즈와 외부 전자기파 합성

디지털 주파수 변환 스펙트럼은 연속형 함수가 아닌 이산형(discrete)함수이므로 수신되는 주파수가 각 주파수 변환점에 정확히 일치하지 않는 경우는 해상도 문제가 야기된다. 대부분의 경우가 한 주파수점에 일치하지 않고 두 주파수점 사이에 위치하게 되는데 이 때는 수신되는 신호의 성분이 주변 주피수점으로 누설되는 형태로 나타난다[9]. 그림 3 과 그림 4 는 같은 크기의 신호를 주파수만 주파수폭(CPSD 의 두 주파수점간의 폭)의 1/2 만을 변화시켜서 discrete 파워스펙트럼으로 변환한 것을 나타낸 것이다. 그림 3 의 경우는 수신주파수가 정확히 주파수 변환점에 맞는 경우로서 신호의 모든 에너지가 한점에 나타난다. 그러나 대부분의 경우 그림 4 와 같이 수신신호의 주파수는 두개의 주파수점 사이에 오게 되고 이경우는 신호변환 값이 근접 두개의 주파수점뿐만 아니라 그 주변의 여러 주파수점으로 확산되게 된다. 이때는 이 모든 점에 있는 변환 크기를 합하여야 수신되는 주파수 신호의 에너지 크기가 된다. 그림 4 는 수신되는 주파수가 스펙트럼 두 주파수점 사이의 한 가운데 있는 경우로 인접 영역으로 수신에너지의 정보가 누설되는 것을 보여준다. 1024 개의 샘플을 사용하여 512 개의 주파수점을 생성하는 경우 최근접 두개의 주파수점에는 총에너지의 81%(0.405x2)만 모이게 된다. 수신 주파수의 좌우 각 10 개 총 20 개의 주파수점에는 총에너지의 98%가 들어가게 되고, 40 개 주파수점의 에너지를 합하면 99%가 된다.

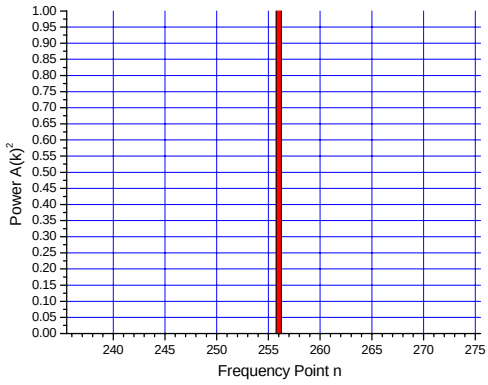


그림 3. 입력주파수=256 일 때 에너지분포

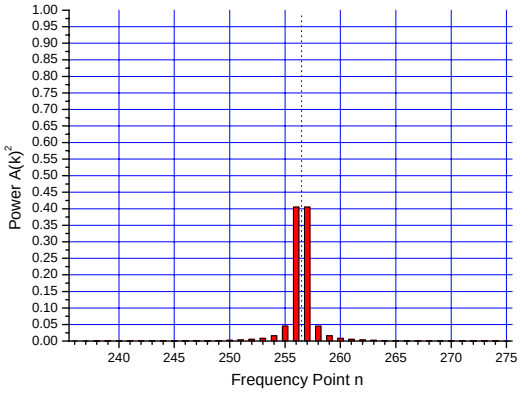


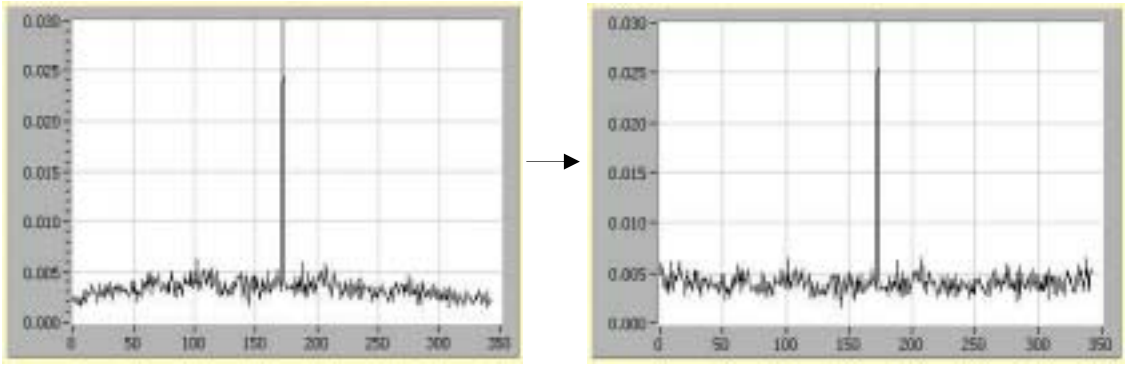
그림 4. 입력주파수=256.5 일 때 에너지 분포

위와 같은 디지털 주파수변환에 있어서의 주파수 누설을 고려하여 최대 피크가 감지된 지점의 좌우 N 개의 값을 모두 제거한 CPSD 로 대체하여 공통 EMI 신호를 제거한 스펙트럼을 생산한다.

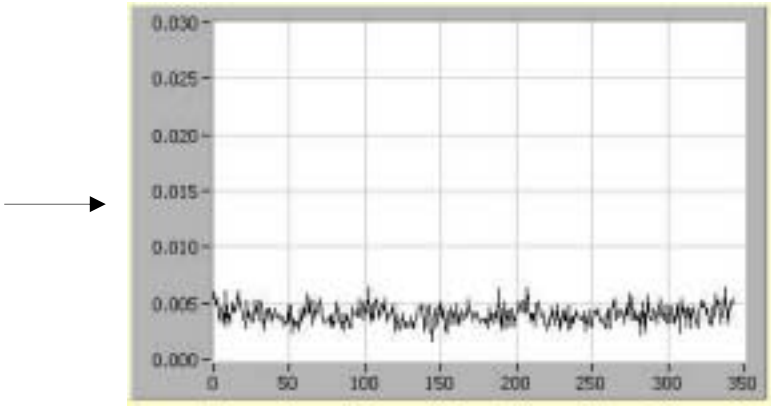
3. 실험결과

고이득 신호증폭기는 넓고 평평한 통과대역을 얻기가 힘들다. 그림 2 의 마지막 그림에서 보는 바와 같이 통과대역의 중심주파수에서 멀어질수록 이득이 낮아지게 된다. 따라서 이득이 감소되는 중심주파수로부터 먼 영역의 크기를 보상하여 전체 CPSD 를 직선화 하여 신호 분석을 수행한다.

1024 개의 샘플신호 블록을 디지털주파수변환하여 구해진 512 개의 CPSD 변환값 중에서 평균값보다 표준편차의 α배를 초과하는 값은 그 최대점 주변의 좌우 N 개와 함께 제거되고 평균값으로 대체되는 논리를 구현하여 실험하였다. CPSD 의 값을 대체하면 표준편차도 변경되므로 CPSD 값 중에서 가장 큰 값부터 제거하고 다시 평균과 표준편차를 구하여 순환적으로 모든 CPSD 의 값이 평균값으로부터 표준편차의 α배를 넘지 않을 때까지 제거를 반복하면 된다. α는 순수하게 존슨 노이즈(Random Signal)로만 CPSD 를 생산할 때 거의 모든 CPSD 값이 포함되는 설정치(Threshold)을 선정한다. 신호블럭크기 1024 개의 CPSD 를 10 회 평균하여 한 CPSD 분포를 생산하는 경우 α는 7 이상이면 된다. α가 이 값보다 작으면 존슨 노이즈의 일부가 외부 EMI 신호로 간주되어 제거되고 α를 너무 크게 하면 작은 EMI 신호가 존슨 신호로 간주되어 제거되지 않을 수 있다. N 의 값이 클수록 EMI 피크의 영향을 상쇄하게 되지만 유효한 CPSD 갯수가 줄어들게 되므로 (3)식에서 측정값의 Uncertainty 가 증가하게 된다. 그림 5 는 신호처리 단계별 CPSD 를 표시한 것이다. 두번째 그림은 CPSD 를 평탄화한 것이고, 세번째은 EMI 가 제거된 것이다. 이 실험에서 α는 7, 그리고 N 은 40 을 선정하였다.



이득곡선 교정(Gain Correction)



EMI 신호 제거후의 PSD

.

그림 5. 디지털 신호처리 계통의 기능 계통도

4. 결 론

전통적인 온도측정방법보다 매우 복잡한 신호처리과정을 필요로 하는 존슨 노이즈 온도계측시스템은 외부에서 유입되는 작은 EMI 신호라도 많은 오차를 유발하게 된다. 이 외부잡음의 제거할 때 고려해야 하는 주파수 해상도 문제를 논의하고 제거 논리를 실험하였다. 에너지 누설을 고려하여 너무 넓은 주파수범위의 에너지 정보를 삭제하면 시스템의 정확도를 훼손하게 되므로 이 두가지의 반대되는 요인을 조화시켜서 설계하는 것이 필요하다. 가능하면 샘플링주파수를 낮추고 CPSD 의 Block 크기를 최대로 하는 것이 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업 일환으로 수행되었음.

참고문헌

[1] Robert Michael J., et al, “Application of Johnson Noise Thermometry to Space Nuclear Reactors,” Proceedings of the 6th Symposium on Space Nuclear Power Systems, Albuquerque, NM, Jan. 8-12, 1989. Vol. 1

[2] Oakes L.C. and Shepard R.L., “Johnson Noise Thermometer for High-radiation and High Temperature Environments,” Manuscript for 5th Symposium on Space Nuclear Power Systems, Albuquerque, NM, Jan. 11-14, 1988.

[3] Decreton Marc C., “High Temperature Measurement by Noise Thermometry,” IAEA International Working Group on Gas Cooled Reactors Specialists’ Meeting on Gas Cooled Reactor Core and High Temperature Instrumentation, Windermere, England, June 14-17, 1882.

[4] Blalock T.V. and Shepard R.L., “A Decade of Progress in High-Temperature Johnson Noise Thermometry,” Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol.5, Part2, American Institute of Physics, Washington, D.C., pp. 1219-1237, 1982.

[5] Shepard R.L. and Weiss, J.M., “Use of Sp-100 Thermometry Technology to Improve Operation of Electric Power Plants,” IECTEC 96, Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington, D.C. pp114-118, 1996

[6] Borkowski C.J. and Blalock T.V., “A New Method of Johnson Noise Thermometry,” Rev. Sci., Instrum., 45(2), 151, 1974.

[7] 황인구 외, “존슨 노이즈 온도계측기술에 대한 고찰,” 2002 원자력학회 춘계학술발표회, 광주 2002.

[8] 황인구 외, “존슨 노이즈 온도계측기 신호처리방법,” 2003 원자력학회 춘계학술발표회, 경주, 2003.

[9] Robert Michael J, “JNT Channel Calibration Using the Sinusoidal Calibration Signal,” a white paper provided to KAERI, December, 2002