

비선형 분석에 의한 뇌파 아티팩트 검출 알고리즘

김철기¹, 박준모², 김남호^{1*}

¹부경대학교 공과대학 제어계측공학과, ²동명대학교 공과대학 전자및의용공학부

EEG Artifact Detection Algorithm Base on Nonlinear Analysis Method

Chul-Ki Kim¹, Jun-Mo Park², Nam-Ho Kim^{1*}

¹Dept. of Control and Instrumentation Eng., Pukyong National University

²School of Electronic and Biomedical Engineering, Tongmyong University

요 약 수술 중 마취 깊이를 측정하는 방법으로 뇌파를 이용한 다양한 파라미터들이 사용되고 있으며, 실제 임상에서는 선형 분석 기법 중 하나인 SEF가 널리 사용되고 있다. 그러나 최근 EEG를 포함한 생체학적 신호는 비선형 성질을 가지고 있다는 연구결과가 발표되면서, 이를 기반으로 한 파라미터 개발이 이뤄지고 있다. 본 연구에서는 보다 정확한 EEG 측정과 분석을 위해 비선형 분석 기법 기반의 파라미터를 개발과 이에 대한 정현파 분석을 통한 데이터와의 비교 분석을 통해 수술 중 전자장비와 EEG 계측 시 혼입될 수 있는 노이즈를 추출하고자 한다.

• 주제어 : 뇌파, 바이스펙트럼 분석, 비선형분석, 마취심도, 고차 스펙트럼 분석

Abstract Various parameters are used to measure anesthetic depth during surgery using brain waves, and in actual clinical use, the linear analysis SEF is widely used. However, with recent studies showing that biological signals including EEG, contain nonlinear properties interest in nonlinear analysis of brain signals is increasing and parameters based on these are being developed. In this study, we are going to develop a parameter that can measure EEG using the nonlinear analysis method and extract noise that can be mixed with external electronic equipment and EEG instrumentation by comparing it with the data from the bispectrum analysis of static waves.

• Key Words : EEG, Bispectral analysis, Nonlinear analysis, Anesthesia depth, High order spectrum analysis

Received 07 January 2020, Revised 20 February 2020, Accepted 21 March 2020

* Corresponding Author Namho Kim, Dept of Control and Instrumentation Eng, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, Korea. E-mail: nhk@pknu.ac.kr

I. 서론

뇌파는 뇌의 활동으로 인해 나타나는 전기 신호이며, 이를 통해 임상에서는 환자의 신경학, 정신학적 질병을 판단하는데 있는 많은 정보를 얻고 있다. 또한 최근에는 이러한 뇌파를 기반으로 하여 수술시 환자의 각성 및 마취심도를 계측함에 있어서 정량적 파라미터들이 개발되고 있으며, 과거 아날로그 방식에서 성능이 뛰어난 디지털 방식으로 전환되면서 정확성과 효율성이 높아지고 있다. 그러나 뇌파는 특정 부분에서가 아닌 뇌 전체의 신경세포들의 활성화로 인하여 나타나는 미세한 신호이기 때문에, 뇌파를 측정함에 있어서 안구운동, 심전도, 근전도 등의 간섭과 수술실 내부의 여러 가지 요인들로 인해 artifact가 발생하기도 한다. 이러한 artifact들은 실제 뇌파와 혼입되어 분석되기 때문에 잘못된 분석 결과는 환자의 상태를 정확히 판단하기 어렵게 하고 이는 수술 중 예기치 않은 상황을 유발시킬 수 있으므로, 정확한 판단과 적절한 시술을 위해 적절한 artifact의 제거는 중요한 요소가 되고 있다[1].

과거에는 뇌파를 분석하는데 있어 주파수 분석, 스펙트럼 분석, 선형 통계 분석 등 선형 분석 기법을 주로 활용해 왔으나, 최근 뇌파를 포함한 생체 신호는 비선형적 성질을 내포하고 있다는 연구들이 발표되면서 뇌파 신호에 대한 비선형 분석 기법에 대한 관심이 높아지고 있다[2]. 뇌는 상태에 따라 각기 다른 카오스 상태를 가지게 되는데 이것들은 상관차원이나 리아프노프지수(Lyapunov Exponent)와 같은 비선형 동역학적 분석법에 의해 정량화 할 수 있음이 알려져 있다[3, 4]. 최근 이러한 비선형 파라미터들은 주파수 분석과 위상결합에 대한 데이터를 추출하고 있는 등 새로운 비선형 마취심도 지표의 구현에 이용되고 있다[5].

본 연구에서는 정현파 신호에 대한 바이스펙트럼 분석 결과와 수술 중 계측된 뇌파에 대한 바이스펙트럼 결과의 비교 분석을 통해 뇌파 측정 중 혼입될 수 있는 노이즈에 의한 영향을 확인하고 비선형 분석 기법인 바이스펙트럼 분석을 기반으로 artifact 제거를 위한 파라미터 개발 가능성을 확인해 보고자 한다.

II. 관련 연구

2.1 바이스펙트럼 분석(Bispectral analysis)

뇌파에서의 비선형 분석은 뇌파 신호로부터 보다 많은 정보를 얻기 위해 2차 푸리에 변환 이상의 해석이 요구되며, 고차스펙트럼에 의해 이러한 정보들을 분석해 낼 수 있다. 즉, 뇌파 신호의 푸리에 성분 사이에서 비선형적으로 발생하는 위상결합을 검출하거나 비선형 신호의 특징을 분석하기 위해 고차스펙트럼이 요구된다[7]. 고차스펙트럼에서 특히 2차 스펙트럼을 파워스펙트럼, 3차 스펙트럼을 바이스펙트럼이라고 하며, 바이스펙트럼은 3차 큐물런트 항의 2차 푸리에 변환으로 정의된다. 큐물런트는 비주기적인 신호를 분석하는데 많이 사용되며 입력 신호 $X(t)$ 에 대해 k 차 큐물런트는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$C_k(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = E[x(t)x(t+\tau_1)\dots x(t+\tau_{k-1})] \quad (1)$$

여기서, $\tau_1, \dots, \tau_{k-1}$ 는 시간지연 (time lag)이며, $E[\]$ 는 기대치를 의미한다. 큐물런트와 유사한 방법으로 k 차 모멘트 (moments)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_k(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = E[x(t)x(t+\tau_1)\dots x(t+\tau_{k-1})] \quad (2)$$

여기서, $\{x(t)\}$, $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 의 평균값은 0 즉, $E[x(t)]=0$ 이다. 그리고 정상 상태를 유지하는 실수 값을 갖는 랜덤 프로세스라고 가정하면, 큐물런트와 모멘트의 2차 관계는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 3차 관계는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다[8].

$$E[x(t)x(t+\tau_1)] = m_2(\tau_1) = c_2(\tau_1) \quad (3)$$

$$E[x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)] = m_3(\tau_1, \tau_2) = c_3(\tau_1, \tau_2) \quad (4)$$

2.2 바이스펙트럼에 의한 비선형 위상결합

임의의 시계열 신호로부터 발생된 서로 다른 독립적인 주파수의 고조파(harmonics) 성분이 비선형적으로 결합되어 서로의 주파수에 영향을 주어 다른 주파수를 만들어 내는 것을 위상결합이라고 한다. 바이스펙트럼으로 비선형 신호를 분석하면 큐물런트의 대칭성에 의

해 한 개의 영역에서 바이스펙트럼 값을 구할 수 있고, 위상결합이 일어나는 주파수를 분석해 낼 수 있다. 이러한 위상결합의 결과를 더 정확하게 보기 위해 바이스펙트럼을 정규화한 바이코히어런스는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$BC(\omega_1, \omega_2) = \frac{B(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{P(\omega_1)P(\omega_2)P(\omega_1 + \omega_2)}} \quad (5)$$

바이코히어런스는 위상결합 현상을 더욱 확연하게 나타내 준다. 즉, 커플링이 일어나는 주파수 대역값은 주파수 값이 크게 나타나므로 정규화하면 더 큰 값으로 나타나고 위상결합이 없는 대역은 작은 값을 가지므로 정규화하면 거의 제로에 가깝게 된다[9].

III. 본론

3.1 뇌파 신호 계측과 전처리

뇌파 측정은 international 10-20 Electrode Placement 법 중 전두엽 FP1 위치에 일회용 접착식 Ag-AgCl 전극을 사용하여 계측하였으며, 뇌파 신호를 획득을 위하여 생체신호계측기(PhysioLab 400, PhysioLab Co., KOREA)를 사용하였다.

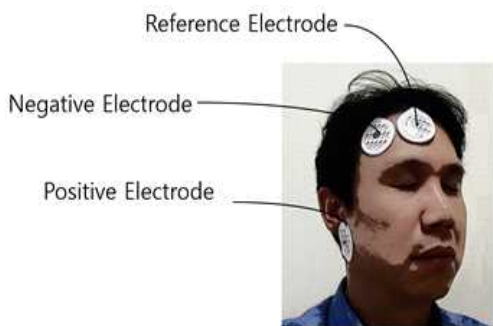


Fig. 1. Electrode attachment method at frontal lobe for measuring EEG signal

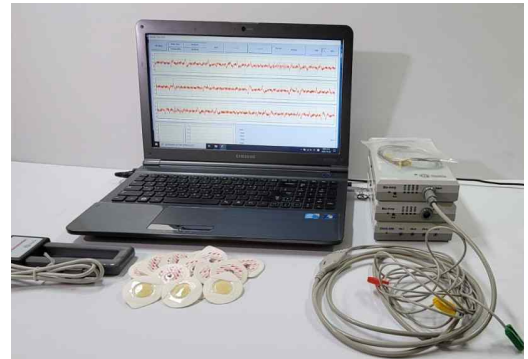


Fig. 2. Bio-signal acquisition system for measuring EEG

두피에서 측정된 뇌파 데이터는 매우 미약하므로 분석이 용이하도록 100K로 증폭하였으며, 35Hz의 LPF와 1Hz의 HPF를 적용하였다. 전원 잡음을 제거하기 위해 60Hz 차단 주파수를 갖는 노치필터를 사용하여 계측하였다. 또한 뇌파 데이터에 존재하는 기저선과 선형추세 성분을 보정하기 위해 기저선 보정기법과 선형추세제거 기법을 적용하였다.

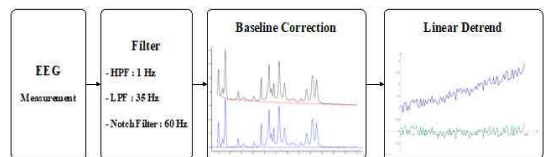


Fig. 3. Pre-processing of EEG signal

3.2 바이스펙트럼(Bispectrum) 분석

바이스펙트럼 분석은 주파수의 위상과 크기에 대한 정도, 위상간 결합 분석 등 기존 전력스펙트럼에 비해 많은 정보를 추출할 수 있다. 바이스펙트럼 분석을 위해 뇌파 계측 직전 5초 데이터 평균과 다음 1초 뇌파 데이터를 교차상관하여 FFT를 구하고 1초간 샘플링된 뇌파 데이터 256개를 하나의 블록으로 설정한 후 설정된 블록 내 데이터와 지연된 첫 번째 및 두 번째 블록 데이터들에 대해 3차 자기상관 연산을 수행하였다.

3차 자기상관 연산을 수행하는 과정은 Fig 4와 같다.

지연된 첫 번째 블록은 설정된 블록 데이터의 1샘플링에 해당되는 부분을 0으로 채워 블록을 형성하였고, 지연된 두 번째 블록은 설정된 블록 데이터의 처

음과 둘째 샘플링 부분을 0으로 채워 블록을 형성하였다. 이러한 방법으로 블록 내의 256샘플에 적용하여 1초간의 바이스펙트럼을 구한 뒤 3차 자기상관 연산 결과에 대해 2차 FFT를 수행하였다. 이러한 2차 FFT 수행 과정은 Fig 5와 같다.

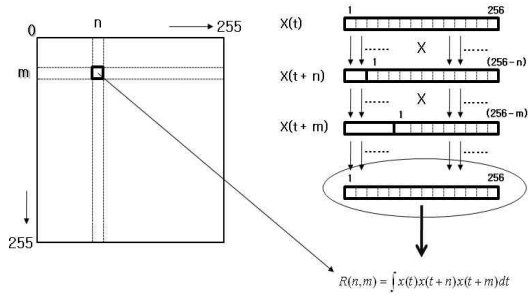


Fig. 4. Execution method of the triple correlation for obtain of bispectrum

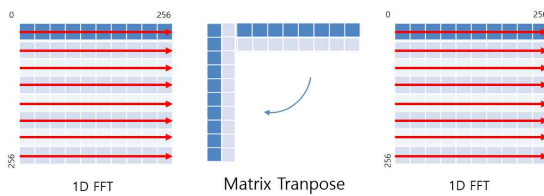


Fig. 5. Execution process of the 2D FFT

3.3 정현파 신호의 바이스펙트럼(Bispectrum) 분석 특성

정현파 신호의 바이스펙트럼 분석 특성을 확인하고 비교 데이터의 확보를 위해 정현파 신호에 대한 바이스펙트럼 분석을 진행한다. 이를 통해 얻어진 바이스펙트럼 결과를 도식화하여 대조군으로 선정한다. 대조군에 사용하기 위해 식 (6)과 같은 뇌파의 저주파와 고주파 대역에 각각 정현파를 적용하였다.

$$x(t) = \sum_{i=k}^n \sin(2\pi f_i t) \quad (6)$$

여기서 n 은 각 뇌파 대역별 주파수 성분의 상수값을 의미하며, k 는 주파수 대역의 시작값을 의미한다. 델타파(1-4Hz), 세타파(4-8Hz) 등의 저주파 대역과 알파파(8-13Hz), 베타파(14-30Hz)의 고주파 대역의 정현파 신호

를 32Hz×32Hz로 설정한 2차원 map에 추출된 바이스펙트럼 분석 데이터를 도식화해 본 결과 Fig 6과 같이, 각 뇌파 대역별로 설정된 주파수 신호에 대해 위상결합이 발생하여 중앙의 대각선 위에 집중하여 나타나는 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 델타파 대역의 경우 입력 주파수 성분은 3Hz, 4Hz, 5Hz로 3개이며, Fig 5의 (a)에서와 같이 2Hz, 4Hz, 6Hz, 8Hz 부근에서 위상결합의 결과로 높은 크기의 스펙트럼이 나타났다. (b), (c), (d)와 같이 다른 뇌파 대역별 주파수 신호에서도 같은 추이를 쉽게 발견할 수 있었다.

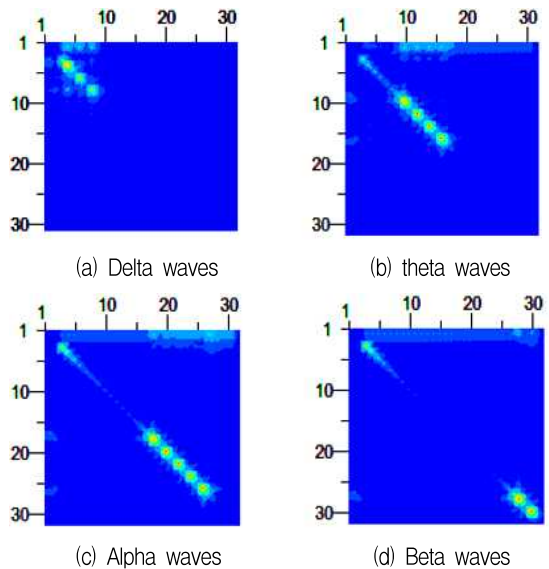


Fig. 6 Bispectrum map of EEG Frequency Bands

IV. 결과

3.3에서 언급한 정현파 신호의 바이스펙트럼 분석 특성을 통해 노이즈가 혼입되지 않은 순수 뇌파의 바이스펙트럼은 고유의 주파수 성분을 중심으로 2차원 map으로 표현할 때 가운데 주파수 좌표에 집중됨을 확인할 수 있었다. 이러한 비교 지표를 이용하여 수술중 환자의 바이스펙트럼 분석 결과에 Artifact가 영향을 주었는지 확인할 수 있을 것이라는 추론을 할 수 있다.

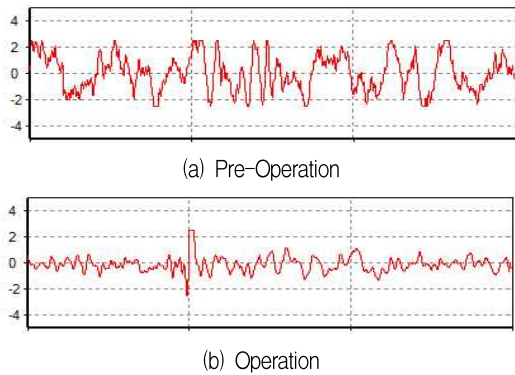


Fig. 7. Raw EEG Data of Patient A

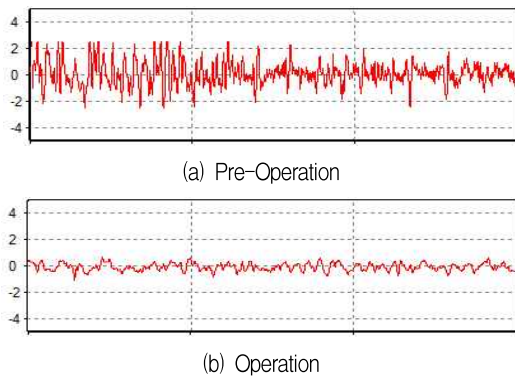


Fig. 8. Raw EEG Data of Patient B

실험을 위해 수술 환자 2명의 뇌파 신호에 대한 바이스펙트럼 분석을 진행하였고 이를 2차원 바이스펙트럼 map으로 도식화하여 Fig. 9에 나타내어 보았다. 두 환자는 서로 다른 시간에 마취가 진행되어 완전히 동일한 조건을 갖춘 상태라고 할 수는 없으나 Fig. 7, 8에서 보는 것과 같이 두 환자 모두가 마취가 진행될수록 서파화되는 일반적인 뇌파의 변화 양상이 확인 할 수 있고 비슷한 수준으로 서파화된 상태에서 바이스펙트럼 분석을 실시하였다.

Fig. 9의 (a)와 (b)는 마취가 충분히 되어 수술중인 상태에 있는 환자의 도식화 된 2차원 바이스펙트럼 map으로 분석 결과에서 확인한 차이를 관찰 할 수 있다. 두 신호는 모두 수술이 진행 중인 상태로서 담당 의료진에 의해 충분한 마취 상태가 유지되고 있음을 확인받은 상태의 뇌파이다.

수술 중인 환자는 통상 2차원 map의 10Hz×10Hz 좌표축 이하에서 피크치를 보여주어야 한다. Fig. 9의 (a)에서는 대부분의 주파수가 중앙 대각선 부근에서 피

크치를 보이고 있어 양호한 신호로 볼 수 있다. 이와 달리 환자 B의 경우 x, y축에 가까운 부근에서 (b)와 같은 높은 강도의 출현이 나타나고 있으며 10Hz×10Hz 이상의 상대적으로 넓은 범위에서 피크가 나타나고 있음을 알 수 있다.

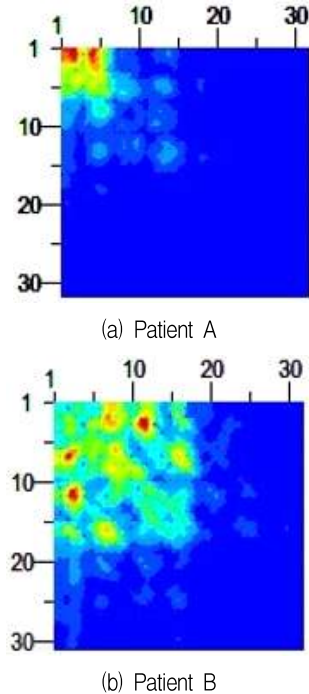


Fig. 9. Bispectrum map of Patient A, B in operation

이는 환자 B는 환자 A에 비해 수술 중 뇌파 계속 시 다양한 artifact들로 인한 고주파의 혼입 영향으로 마취 중 뇌파의 저주파 성분과 고주파 성분의 비선형적 결합이 상대적으로 크게 나타난 결과로 추론할 수 있을 것이다.

V. 결론

순수 정현파 신호의 바이스펙트럼 분석을 통해 일반적인 주파수 신호의 위상결합 추이를 확인하고 이를 실제 수술 중인 환자의 뇌파와 비교하여 뇌파 계속 중 외부 artifact의 혼입이 바이스펙트럼 분석에서 어떠한 양상으로 나타내어지는지 분석하고자 하였다.

실험 결과로부터 마취 심도 판정을 위한 뇌파 측정 시 저주파 신호와 고주파 신호의 위상결합이 나타났으며, 이는 외부에서 혼입된 고주파 성분의 artifact로 인

한 것으로 추론할 수 있었다. 이러한 왜곡된 데이터가 지속적으로 발생한다면 수술 중 마취심도를 신속하게 판정함에 있어 데이터의 신뢰도 저하를 가져올 수 있으며 잘못된 데이터로 인한 오진을 초래할 수도 있어 최종적인 마취심도 판정에 앞서 반드시 바이스펙트럼 map 양상을 참조하는 것이 타당하다는 결론에 이를 수 있을 것이다.

향후 여러 사례의 정현파 바이스펙트럼 분석을 통해 실제 수술 중 환자의 뇌파 계측에 적용할 수 있는 다양한 artifact로 인한 노이즈 제거 파라미터 개발과 마취심도 측정의 기본 지표를 추출할 수 있도록 연구를 지속할 예정이다.

REFERENCES

- [1] S. K. Kim, S. K. Yoo, "Multimodal bio-signal measurement system for sleep analysis," Journal of Korea Multimedia Society, vol. 21, no. 5, pp. 609-616, 2018.
- [2] W. S. Pritchard, W. D. Dennis, K. K. Kelly, "Dimensional analysis of resting human EEG II: Surrogate-data testing indicates nonlinearity but not low-dimensional chaos," Psychophysiology, vol. 32, no. 5, pp. 486-491, 1995.
- [3] M. Esther, ter Braack, C. de Vos Cecile, J. A. M. van Putten Michel, "Masking the auditory evoked potential in TMS-EEG: A comparison of various methods," Brain Topography, vol. 28, pp. 520-528, 2015.
- [4] A. Tara, Whitten, M. Adam, Hughes, T. Clayton, Dickson, B. Jeremy, Caplan, "A better oscillation detection method robustly extracts EEG rhythms across brain state changes: The human alpha rhythm as a test case", NeuroImage, vol. 54, Issue 2, pp. 860-874, 2011.
- [5] J. M. Park, J. D. Park, G. R. Jeon, "EEG signal characteristic analysis for monitoring of anesthesia depth using bicoherence analysis method," The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 55, no. 1, pp. 35-41, 2006.
- [6] J. Kang, J. W. Kim, H. J. Lee, K. J. Oh, "Chaos analysis of real estate auction sale price rate time series," Journal of the Korean Data and Information Science Society, vol. 28, Issue 2, pp. 371-381, 2017.
- [7] H. J. Lee, G. T. Lee, Y. S. Park, K. J. Cha, M. I. Park, J. E. Oh, "A study on the nonlinearity of chaotic signal by bispectral analysis," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 31, no. 8, pp. 817-825, 2007.
- [8] J. M. Park, "Development for the index of an anesthesia depth using the power spectrum density analysis," Journal of Biomedical Engineering Research, vol. 30, no. 4, pp. 327-332, 2009.
- [9] E. S. Kim, Y. J. Lee, "Artificial intelligence: Analysis of nonlinear time series by bispectrum methods and its," The KIPS Transactions: PartA, vol. 6 no. 5, pp. 1312-1322, 1999.

저자 소개

김 철 기 (Chul-Ki Kim)



2004년 2월 : 전북대학교
기계설계학과(공학사)
2019년 3월~현재 : 부경대학교
제어계측공학과(공학석사)
관심 분야 : 신호처리, 뇌 신경계
신호 분석

박 준 모 (Jun-Mo Park)



2008년 8월 : 부산대학교
의공학협동과정(공학박사)
2018년 3월~현재 : 동명대학교
전자및의용공학부 교수
관심 분야 : 신호처리, 뇌 신경계
신호 분석

김 남 호 (Nam-Ho Kim)



1992년 3월~현재 : 부경대학교
제어계측공학과 교수
관심 분야 : 영상처리, 통신시스템,
적응필터와 웨이브렛을 이용한
잡음제거 및 신호복원