

다채널 뇌파 측정 장비의 채널간 이득을 보정 알고리즘

김판기, 안창범
광운대학교 전기공학과

Algorithm of the gain calibration between each channel at Multiple Channel Electroencephalogram Measurement System

Pan-Ki Kim, Chang-Beom Ahn
Dept. Electrical Engineering, Kwangwoon University

Abstract - 본 논문은 뇌파와 같이 측정을 위해서 많은 수의 채널이 필요한 계측 장치에서 채널에 따른 증폭률의 차이를 보정하기 위해 동일한 입력을 가한 후 측정된 시간 영역의 신호를 주파수 영역으로 변환하고 주파수 영역에서의 신호를 분석하여 각 채널의 증폭률의 차이를 유도하고 유도된 증폭률의 차이를 보정하는 알고리즘을 소개한다. 본 논문은 다채널 시스템에서 측정된 신호를 주파수 스펙트럼으로 변환하는 단계와 스펙트럼에서 각 채널의 이득률을 분석하는 단계를 포함하는 다채널 시스템에서 채널간 이득률을 보정하는 방법을 제안한다.

1. 서 론

뇌파 신호는 신경계에서 뇌신경 사이에 신호가 전달될 때에 나타나는 전기적 변화를 측정하기 위해 두피나 대뇌 피질에 전극을 연결하여 얻어진 신호를 일컬으며 인간의 심리 상태나 몸의 상태에 따른 뇌의 활동이 반영된 신호이다.

뇌파 신호를 기록하기 위해서는 침습적인 방법과 비침습적인 방법이 있는데, 침습적인 방법은 얇은 바늘형태의 전극을 대뇌의 피질에 연결하여 뇌파신호를 기록하는 것이고, 비침습적인 방법은 전도성 젤이 발라진 전극을 두피에 붙여서 뇌파 신호를 기록하는 것이다. 이때 침습적으로 얻어진 뇌파 신호의 크기는 대략 1~2mV 정도이고, 비침습적으로 얻어진 뇌파 신호의 크기는 보통 50uV~100uV 정도이다.

뇌파의 측정을 위해서는 앞에서 말한 것처럼 두피나 대뇌의 피질에 전극을 연결하여 신호를 측정하게 된다. 측정된 신호는 수백uV 정도의 아주 작은 신호이기 때문에 이 신호로부터 주파수 해석과 같은 뇌파 신호의 분석을 위한 신호처리를 하기 위해서는 전극으로부터 얻게 되는 수백 uV 정도의 뇌파 신호를 수만 배 정도 증폭해야 한다. 이러한 수만 배의 신호 증폭은 대뇌 기능을 평가하기 위한 정밀한 계측 시스템에서 채널과 채널간의 증폭률의 편차를 불러올 수 있다. 이러한 편차는 증폭을 위한 하드웨어의 미세한 오차로부터 증폭되는데, 각 부위별 신호의 크기를 비교하여 대뇌 기능을 평가하는 뇌파 측정 시스템에서 결과값에 오차를 불러올 수 있다.

종래의 채널간 분석 방법은 측정된 신호의 첨두치나 특징점의 크기를 비교하는 방법으로써, 신호의 크기가 작고 노이즈가 상대적으로 큰 생체신호 측정 시스템과 같은 경우에는 노이즈나 오프셋 그리고 필터 특성에 따른 신호 지연 효과에 대한 적절한 보상이 이루어지지 못하였다.

이러한 다채널 계측 장비에서 나타나는 채널간의 신호 크기의 차이를 줄이기 위해 종래에는 측정된 뇌파 신호로부터 각 채널의 신호의 첨두치나 특징점의 크기를 비교하는 방법으로 채널간의 신호 증폭률을 보정한다. 하지만 아주 작은 신호인 뇌파신호는 신호 대 잡음비(SNR)가 좋지 못하여 노이즈에 취약하고 오프셋이나 필터 특성에 따른 신호 지연 효과에 대한 적절한 보상이 이루어지지 못하였다.

본 논문에서는 다채널을 가지는 뇌파 측정 시스템에서 나타날 수 있는 채널간의 미세한 신호 크기를 보정하기 위해 측정된 신호의 주파수 변환을 통한 스펙트럼에서 관심 주파수의 크기를 비교하여 각 채널의 스케일 값을 찾아 채널과의 이득률 차이를 보정하는 방법을 제안한다.

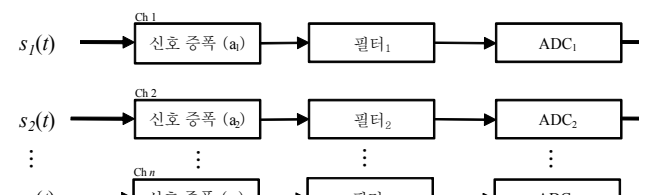
2. 본 론

2.1 다채널 시스템에서의 잡음 특성

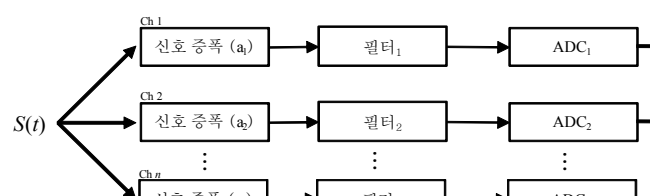
다채널 시스템에서의 잡음 특성을 설명하기 위해 <그림1>에 다채널 시스템의 개요도를 나타내었다. 다수의 입력 데이터를 비슷한 특성을 가지는 증폭기와 필터 등을 사용하여 측정하는 시스템이다. 다채널 시스템에서 각 채널의 이득률을 측정하기 위한 기준 신호는 하나의 신호원을 모든 채널에 연결한 후 측정한다.

상기 조건에 의해 다채널 시스템으로부터 측정된 신호는 각 채널의 증폭률, 필터 특성, 아날로그-디지털 변환(ADC)의 멀티플렉싱 등으로 인한 시간 지연 등의 시스템 특성이 반영된 신호와 주변의 노이즈가 합쳐진 신호로 나타낼 수 있다.

입력 신호가 미약한 다채널 측정 시스템에서는 높은 증폭률이 필요하고, 또한 잡음을 차단하기 위한 다양한 필터가 적용된다. 따라서 측정된 신호는 SNR이 낮은 경우가 많고, 필터 특성에 따른 시간지연 등이 나타날 수 있다. 또한 채널별 오프셋이 다르게 나타날 수 있다. 이러한 면을 고려하여 <그림 2>에서와 같이 하나의 신호원을 모든 채널에 연결한 후 측정된 신호는 (식-1)과 같이 나타낼 수 있다.



<그림 1> 다채널 시스템의 개요



<그림 2> 다채널 시스템에 기준 신호 입력

$$x_i(t) = a_i s(t - d_i) + n_i(t) + O_i \quad (\text{식-1})$$

여기에서 i 는 채널, $x_i(t)$ 는 채널에서 측정된 신호, a_i 는 채널 증폭률, $s(t)$ 는 공통의 입력신호, d_i 는 시간 지연, $n_i(t)$ 는 잡음, O_i 는 오프셋을 나타낸다.

종래의 방법은 다채널 시스템에서 측정된 신호의 특정 시점에서의 신호 크기를 비교하여 동일한 신호의 크기가 되도록 채널간의 이득률을 계산하였다. 이를 설명하기 위해, 편의상 입력신호 $s(t)$ 를 (식-2)와 같이 정현파로 표시하면 $t = 0$ 에서의 출력신호는 (식-3)과 같이 주어진다.

$$s(t) = \cos(2\pi f_0 t) \quad (\text{식-2})$$

$$x_i(0) = a_i \cos(d_i) + n_i(0) + O_i \quad (\text{식-3})$$

(식-3)으로부터 출력값을 일정하게 만들기 위한 채널별 보정 계수는 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{B}_i = \frac{K_1}{x_i(0)} \quad (\text{식-4})$$

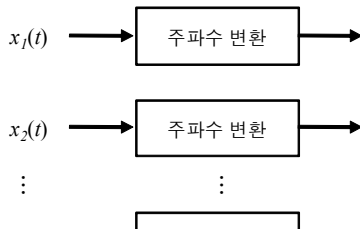
여기에서 K_1 는 채널과 무관한 일정한 상수이다. (식-4)는 (식-3)에서 보듯이 $x_i(0)$ 의 노이즈, 오프셋, 필터나 다채널 ADC에 의한 시간지연 등의 영향이 첨가되어 있어 (식-5)로 주어지는 순수 증폭률의 보정 계수와 차이가 많음을 알 수 있다.

$$B_i = \frac{K_1}{a_i} \quad (\text{식-5})$$

따라서 (식-4)의 보정계수는 잡음, 옵셋, 필터나 다채널 ADC에 의한 시간지연 등으로 나타나는 외부요인에 의해 취약하다는 것을 알 수 있다.

2.2 주파수 스펙트럼을 이용한 보정 방법

본 논문에서 제안하는 보정 방식은 앞에서 제시한 문제점들을 극복하기 위해 측정된 신호 $x_i(t)$ 를 주파수 변환하여 관측하고자 하는 기준 주파수 성분의 크기를 비교하여 보정계수를 구한다. 이 방법은 <그림 3>에 보인 것처럼 시간영역의 신호를 주파수로 변환한 후 특정한 스펙트럼의 크기로 보정계수를 구한다.



<그림 3> 입력 신호를 주파수로 변환

(식-1)의 $x_i(t)$ 를 푸리에 변환하여 주파수 영역으로 변환하면 (식-6)이 된다.

$$X_i(f) = \mathcal{F}\{x_i(t)\} = a_i \mathcal{F}\{s(t)\} e^{j2\pi f d_i} + \mathcal{F}\{n_i(t)\} + O_i \delta(f) \quad (\text{식-6})$$

여기에서 $\mathcal{F}(\cdot)$ 는 푸리에 변환을 나타내며, f 는 주파수를 나타낸다. 기준 주파수 f_1 에서의 스펙트럼은 (식-7)과 같이 주어진다.

$$|X_i(f_1)| \cong a_i |\mathcal{F}\{s(t)\}| + |\mathcal{F}\{n_i(t)\}| \quad (\text{식-7})$$

따라서 보정계수는 (식-8)로 주어진다.

$$\hat{E}_i = \frac{K_2}{|X_i(f_1)|} \quad (\text{식-8})$$

(식-7)에서 알 수 있듯이 푸리에 변환을 함으로써 옵셋 효과를 제거할 수 있고, 노이즈를 줄일 수 있다. 일반적으로 m 개의 point로 푸리에 변환을 하면 노이즈는 $2/\sqrt{m}$ 으로 감소하고, f_1 이 0Hz가 아니라면 옵셋의 영향을 배제할 수 있다. 그리고 필터링과 ADC로 인해 나타나는 시간 지연에 의한 영향은 (식-6)에서 보듯이 위상으로 나타나는데 절대값을 취함으로써 제거할 수 있다.

구해진 보정계수는 <그림 4>에서 보인 것처럼 각 채널의 출력에 곱함으로써 채널간 이득률의 차이를 보정하게 한다.

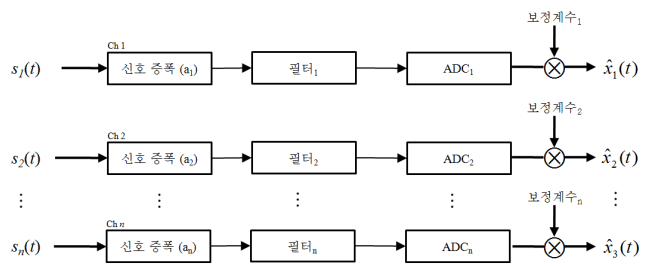
3. 결 과

본 논문에서 제안하는 채널간 이득률 보정 방법의 잡음과 신호간의 위상지연에 대한 성능을 시뮬레이션하기 위해 20%의 가우시안 노이즈를 추가한 10Hz 정현파는 <그림 5>와 같다. 채널간의 잡음 영향을 살펴 보기 위해 <그림 5>와 같은 방식으로 생성된 100개의 데이터 세트를 얻고, 같은 시점의 첨두치 위치에서의 크기를 그래프로 보이면 <그림 6>과 같다.

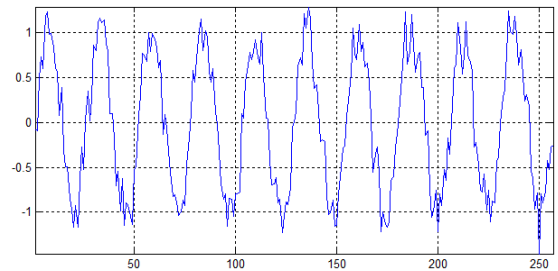
기존의 첨두치 기반의 방법과 제안된 스펙트럼 기반의 방법은 <표 1>에서와 같다. <그림 6>에서의 데이터의 평균은 0.998이고 표준편차는 0.218, 그리고 SNR은 4.578로 나타났다. 반면에 <그림 5>와 같이 만들어진 신호를 각 채널별로 푸리에 변환하여 각각의 10Hz 성분의 크기를 측정하였을 때의 데이터를 <그림 7>에 나타내었다. 이 경우 평균은 0.999이고 표준편차는 0.00337, 그리고 SNR은 296.087로 나타났다. 따라서 시간영역에서의 SNR과 스펙트럼으로 변환한 SNR은 64.67배의 차이가 난다. 이를 통해 노이즈가 심한 데이터의 경우 주파수 변환을 통하게 되면 노이즈의 영향이 상당히 줄어들게 됨을 알 수 있다.

구분	기존 첨두치 기반	제안된 스펙트럼 기반
평균	0.998	0.999
표준편차	0.218	0.00337
SNR	4.578	296.087

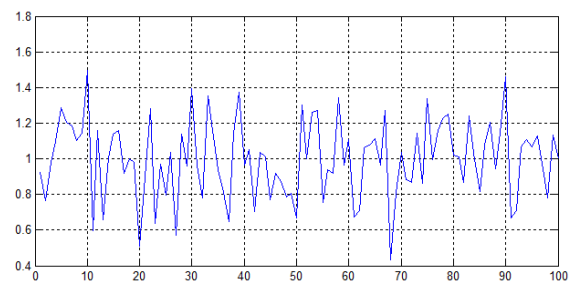
<표 1> 기존 방법과 제안된 방법의 결과



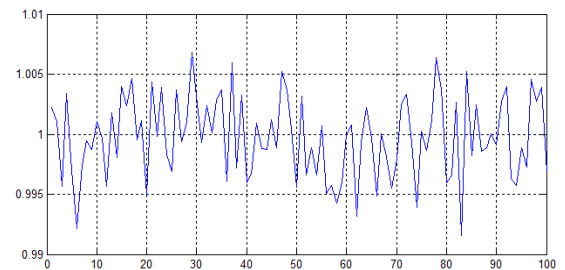
<그림 4> 보정 계수를 적용 개요도



<그림 5> 잡음과 위상에 대한 시뮬레이션 데이터



<그림 6> 100개의 데이터에서 얻은 첨두치의 크기



<그림 7> 100개 데이터에서 얻은 10Hz 성분 크기

시스템의 각 채널간의 서로 다른 시간 지연도 이득률을 구하는데 큰 영향을 준다. 시간지연의 차이가 있는 신호를 푸리에 변환 할 경우 스펙트럼의 절대값은 동일하고 위상에만 변화가 있으므로 (식-8)과 같이 절대값을 취할 경우 위상 효과는 사라지기 때문에 보정 계수는 영향을 받지 않는다.

4. 결 론

본 연구는 측정된 데이터를 주파수 변환을 통해 노이즈의 영향을 줄일 수 있고, 연산과정이 단순하면서도 명료하고, 채널 간의 서로 다른 시간 지연의 영향이 없으며, 임의의 캘리브레이션 과정에 대해서도 채널간의 이득률을 보정하는 데에 용이하다. 그리고 선택한 주파수 대역의 신호를 이용하여 채널의 이득률을 보정 할 수 있는 장점이 있다.

[감사의 글]

본 연구는 중소기업청에서 시행하는 산학협력실사업의 지원을 받았음.

[참고 문헌]

[1] Haykin, Van Veen "Signal and Systems 2nd ed", Wiley, NY, 2003