

고차의 미분에너지함수를 이용한 주파수 및 진폭성분 추출 알고리즘과 응용

論 文
56-8-25

Frequency/Amplitude Separation Algorithm Using the Higher Order Differential Energy Operator and Its Application

林炳寬[†]
(Byeong-Gwan Iem)

Abstract – There have been many different definitions of energy functions as the second statistics of a signal. In this paper, using the higher order differential energy function, we propose an algorithm separating the amplitude and frequency components in a discrete sinusoidal signal. The proposed amplitude and frequency estimation methods have less computational requirement than the existing methods. It also shows large computational advantage over the root mean square (RMS) calculation of a signal. The proposed methods can be used in the detection of abnormal events in signals on the power line. Computer simulations show that proposed frequency estimation method can detect the presence of voltage increase or decrease for a short period of time. Also, the proposed estimation methods have been compared with existing methods in terms of estimation error variance.

Key Words : Instantaneous Frequency/Amplitude, 미분에너지 함수, 순간주파수, 순간진폭

1. 서 론

신호의 순간주파수는 신호를 특징짓는 주요한 인자이며 다양한 응용분야에서 사용된다. 예를 들어, 대역통과된 음성 신호의 경우, 순간주파수를 측정하여 음성신호의 기본주파수 혹은 포먼트 주파수를 추정할 수 있다. 이러한 순간주파수를 추정하는 고전적인 방법으로는 신호의 위상을 미분하여 구할 수 있다 [1], 비교적 최근에 사용되는 방법으로는 신호의 이차통계인 시간주파수함수를 구한 후, 주파수 모멘트를 구하여 순간주파수를 추정하는 방법을 들 수 있다 [1].

고전적인 정의는 신호의 위상을 시간에 대하여 미분을 취하는 것이다 [1,2]. 이러한 정의의 타당성은 복소 정현파 신호의 위상과 주파수 사이의 관계에서 쉽게 볼 수 있다. 만약 신호가 실수 값을 갖는다면, 신호는 먼저 힐베르트 변환되어, 위상 값을 얻은 후에 미분을 취하여 순간주파수를 구한다. 즉 실신호 $x(t)$ 에 대하여 복소신호 $x_a(t)$ 는 아래와 같다. $x_a(t) = x(t) + jH\{x(t)\} = a(t)e^{j\phi(t)}$. 여기에서 $x_a(t)$ 는 $x(t)$ 의 복소신호, $H\{x(t)\}$ 는 $x(t)$ 의 힐베르트 변환, $a(t)$ 는 $x_a(t)$ 의 진폭신호, $\phi(t)$ 는 $x_a(t)$ 의 위상신호이다. 순간주파수 $f(t)$ 는 위상의 미분이므로 $f(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$ 로 정의한다 [2]. 이러한 순간주파수 정의

는 힐베르트 변환을 필요로 하기 때문에 상대적으로 많은 계산량을 요구한다.

최근, 에너지함수를 이용하여 신호의 순간주파수를 구하는 방법이 활발히 연구되고 있다 [3,4]. 신호의 이차함수를 포함하는 통계값으로서 다양한 에너지 함수가 소개되어 왔다. 대표적인 예로서 다음과 같이 정의되는 Teager-Kaiser 에너지 함수를 들 수 있다. [5]

$$\Psi\{x(t)\} = (x'(t))^2 - x(t)x''(t) \quad (1)$$

정현파 신호에 적용될 때, Teager-Kaiser 에너지함수는 정현파 신호를 발생하는데 요구되는 에너지의 양을 보여준다 [5]. 즉, 신호 $x(t) = A \cdot \sin(\omega t)$ 일 때, 에너지 함수는 $\Psi\{x(t)\} = A^2\omega^2$ 으로 주어진다. 이와 같은 에너지 함수를 이용하여 Teager는 음성신호 발생시에 성도로 흡입되는 공기흐름을 분석하였다 [5]. Kaiser 등은 (1)의 Teager-Kaiser 에너지 함수를 이용하여 AM-FM신호 $x(t) = a(t)\cos(\phi(t))$ 에서 진폭(AM) 성분 $|a(t)|$ 과 주파수(FM) 성분 $w_i(t)$ 을 분리하는 알고리즘을 아래와 같이 제안하였다 [3,4].

$$w_i(t) \approx \sqrt{\frac{\Psi\{x'(t)\}}{\Psi\{x(t)\}}} \quad (2)$$

$$|a(t)| \approx \frac{\Psi\{x(t)\}}{\sqrt{\Psi\{x'(t)\}}} \quad (3)$$

아울러, 이산 AM-FM신호 $x(n) = a(n)\cos(\phi(n))$ 에 대하여 진폭(AM) 성분 $|a(n)|$ 과 주파수(FM) 성분 $f(n)$ 을 분리하는 알고리즘(Kaiser)을 아래와 같이 제안하였다 [3,4].

[†] 교신저자, 正 會 員 : 江陵大 工大 電子工學科 助教授 · 工博

E-mail : ibg@kangnung.ac.kr

接受日字 : 2007年 3月 9日

最終完了 : 2007年 6月 28日

$$f_{Kaiser}(n) \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Psi\{x(n) - x(n-1)\}}{2\Psi\{x(n)\}} \right) \quad (4)$$

$$|a_{Kaiser}(n)| \approx \sqrt{\frac{\Psi\{x(n)\}}{1 - \left(1 - \frac{\Psi\{x(n) - x(n-1)\}}{2 \cdot \Psi\{x(n)\}}\right)^2}} \quad (5)$$

여기에서 $\Psi\{x(n)\}$ 은 이산신호의 Teager-Kaiser 에너지 함수로서 아래와 같이 정의된다.

$$\Psi\{x(n)\} = x^2(n) - x(n+1)x(n-1) \quad (6)$$

유도된 순간주파수 $f_{Kaiser}(n)$ 을 활용하여 Kaiser 등은 음성의 포먼트 주파수를 분석하였다 [4]. 또한, Kaiser에 의하여 유도된 순간주파수는 전력선 신호의 이상현상 검출 [6] 등에 이용되었다.

Teager-Kaiser 에너지 함수의 일반화로서 다음과 같이 정의되는 k차의 미분에너지 함수 $\Gamma_k\{x(t)\}$ 를 생각할 수 있다 [7].

$$\Gamma_k\{x(t)\} = [x, x^{(k-1)}] = x'(t)x^{(k-1)}(t) - x(t)x^{(k)}(t). \quad (7)$$

k=2일때, $\Gamma_k\{x(t)\}$ 는 Teager-Kaiser에너지 함수 $\Gamma_2\{x(t)\} = \Psi\{x(t)\}$ 가 된다. 그리고 k=3, k=4일 때, 미분 에너지함수는 다음과 같다.

$$\Gamma_3\{x(t)\} = [x, x^{(2)}] = x'(t)x^{(2)}(t) - x(t)x^{(3)}(t)$$

$$\Gamma_4\{x(t)\} = [x, x^{(3)}] = x'(t)x^{(3)}(t) - x(t)x^{(4)}(t)$$

이와 같은 고차의 미분에너지함수를 이용하여 Maragos와 Potamianos는 신호 $x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \theta)$ 일 때, 진폭성분 $|A|$ 와 주파수성분 $\omega(t)$ 을 분리하는 알고리즘을 아래와 같이 유도하였다 [7].

$$\omega(t) = \sqrt{\frac{-\Gamma_4\{x(t)\}}{\Gamma_2\{x(t)\}}} \quad (8)$$

$$|a(t)| \approx \frac{\Psi\{x(t)\}}{\sqrt{\Psi\{x'(t)\}}} \quad (9)$$

본 논문에서는 이산정현파신호 $x(n) = A \cdot \cos(\Omega n + \theta)$ 에 대하여 미분에너지함수를 이용하여 주파수와 진폭을 추정하는 알고리즘을 제안한다. 아울러 기존의 에너지 함수를 이용한 순간주파수 추정방법, 고전적인 주파수 추정방법과의 계산량 비교를 한다. 본 논문에서 제시되는 진폭 및 주파수 추정알고리즘은 다양한 분야에 응용될 수 있다. 적절하게 대역 통과된 음성신호는 국지적으로 고정된 진폭과 주파수를 갖는 것으로 가정할 수 있다. 따라서, 음성의 유성음·무성음 검출, 유성음 구간에서 기본주파수 검출 등에 주파수 및 진폭 추정 알고리즘이 사용될 수 있다. 또한 전력선 신호의 이상현상 검출에도 사용될 수 있다. 전력선상에서의 신호는 순수 정현파이므로 정상상태에서 고정된 진폭과 주파수를 갖는다. 따라서 주파수와 진폭의

변화를 검출하여 이상 유무를 판단할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 미분에너지 함수를 이용한 이산신호의 주파수 및 진폭 추정알고리즘을 제시한다. 3절에서는 다양한 주파수 추정알고리즘의 계산량을 비교한다. 4절에서는 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시하고 5절에서는 결론을 맺는다.

2. 진폭 및 주파수 추정알고리즘

2.1 이산신호의 미분에너지함수

미분의 이산화(discretization)에는 다양한 정의가 있다. 미분의 이산화 정의에 따라 이산신호의 미분에너지함수는 달라질 수 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 이산신호의 미분에너지 함수를 사용한다. k차의 미분에너지 함수는 아래와 같이 정의된다 [7].

$$\Gamma_k\{x(n)\} = x(n)x(n+k-2) - x(n-1)x(n+k-1) \quad (10)$$

k=1일 때, (10)의 미분에너지 함수는 $\Gamma_1\{x(n)\} = 0$ 이다.

k=2일때 미분에너지 함수는 (6)의 Teager-Kaiser 에너지 함수와 같다. k=3, k=4일 때, 미분에너지함수는 각각 다음과 같다.

$$\Gamma_3\{x(n)\} = x(n)x(n+1) - x(n-1)x(n+2) \quad (11)$$

$$\Gamma_4\{x(n)\} = x(n)x(n+2) - x(n-1)x(n+3) \quad (12)$$

2.2 이산신호의 주파수추정 알고리즘

식(6)과 (11)을 이용하여 이산신호 $x(n) = A \cdot \cos(\Omega n + \theta)$ 의 순간주파수를 아래와 같이 추정할 수 있다. 이산신호 $x(n)$ 에 2차와 3차의 미분에너지 함수를 적용하면 각각 $\Gamma_2\{x(n)\} = A^2 \cdot \sin^2(\Omega)$ 와 $\Gamma_3\{x(n)\} = 2A^2 \cdot \sin^2(\Omega)\cos(\Omega)$ 가 되며, 이를 조합하여 다음과 같이 주파수를 추정할 수 있다.

$$f(n) = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\Gamma_3\{x(n)\}}{2 \cdot \Gamma_2\{x(n)\}} \right) \quad (13)$$

이와 같은 결과를 대역 통과된 음성신호에 적용하면, 음성신호의 포먼트 주파수 혹은 기본주파수를 추정할 수 있다. 여기에서 대역 필터는 신호에 맞춰 정교히 설계되어 필터링된 음성신호가 주요 주파수 성분만을 지녀야 한다. 또한 위식 (13)의 결과를 전력선상의 신호에 적용하면, 신호의 주파수를 시간의 변화와 함께 측정할 수 있다. 따라서, 일시적인 이상현상의 발생으로 전력선상의 신호에 변화가 발생하는 것을 검출할 수 있다.

2.3 진폭추정 알고리즘

식(6)과 (12)를 이용하여 이산신호의 진폭을 아래와 같이 추정할 수 있다. 이산신호 $x(n) = A \cdot \cos(\Omega n + \theta)$ 에 2차와 4차의 미분에너지 함수를 적용하면 $\Gamma_2x(n) =$

$A^2 \cdot \sin^2(\Omega)$ 이고, $\Gamma_4\{x(n)\} = A^2 \cdot \sin(\Omega) \sin(3\Omega)$ 이다. 따라서 진폭 추정값은 다음과 같다.

$$|A_{Diff}(n)| = \frac{2 \cdot \Gamma_2\{x(n)\}}{\sqrt{3 \cdot \Gamma_2\{x(n)\} - \Gamma_4\{x(n)\}}} \quad (14)$$

이 결과는 정상상태에서 순수 정현파신호가 관측되는 전력선상의 신호를 감시하는데 활용될 수 있다.

전력선상의 신호진폭을 감시하는 다른 방법으로는 실효치 감시를 들 수 있다. 실효치로서 RMS(Root Mean Square)값은 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$|A(n)|_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x^2(n+k)} \quad (15)$$

그러나, 실효치는 식(15)에서 볼 수 있듯이 데이터 블록의 길이 N에 비례하는 계산량을 필요로 한다. 그리고, 데이터 블록 길이 N에 따라 결과 파형 $|A(n)|$ 의 형태가 결정된다. 즉 블록의 길이 N이 작으면 $|A(n)|$ 의 분산이 크고 N이 크면 분산이 작고 평탄한 파형이 된다. 따라서 계산량 측면뿐 아니라 실시간 감시 측면에서 본 논문에서 제안된 방법보다 적절치 못하다.

3. 다양한 알고리즘의 계산량 비교

3.1 기타 주파수 추정 알고리즘

이절에서는 1절과 2절에서 소개 및 제안된 순간주파수 추정 알고리즘 이외에 현재까지 보고된 주요 주파수 추정 알고리즘 가운데 에너지 함수를 이용한 알고리즘을 간단히 소개한다. 대표적인 알고리즘은 Prony방법에 의한 주파수 추정법과 modified covariance(MCOV) 방법에 의한 주파수 추정법을 들 수 있다. 각 방법의 정의는 아래 식과 같다 [9].

$$f_{Prony}(n) \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\Gamma_3\{x(n)\} + \Gamma_3\{x(n+1)\}}{4\Psi\{x(n+1)\}} \right) \quad (16)$$

$$f_{MCOV}(n) \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{N\{x(n)\}}{2(x^2(n-1) + x^2(n) + x^2(n+1))} \right) \quad (17)$$

여기에서 $N\{x(n)\} = x(n-2)x(n-1) + 2x(n) \cdot x(n-1) + 2x(n)x(n+1) + x(n+1)x(n+2)$ 이다.

3.2 계산량 비교

이절에서는 각각의 추정 알고리즘을 계산하는데 필요한 계산량과 데이터 표본의 수를 보인다. 주파수 추정의 경우, 본 논문에서 제안하는 방법 식 (13)의 $f_{Diff}(n)$ 이 기존의 방법에 비하여 덧셈과 곱셈 등에서 약간의 우위를 보인다.

진폭 추정의 경우는 본 논문에서 제안한 식(14)의 $A_{Diff}(n)$ 이 Kaiser 등이 제안한 방법에 비교하여, 덧셈에서만 약간의 우월함을 보인다. 아래 표 1은 본 논문에서 소개된 주파수 추정 및 진폭 추정방법의 계산량을 비교하여 정리한 것이다.

표 1 각 추정 알고리즘의 계산량 비교

Table 1 Computation cost comparison of various estimators

방법		덧셈	곱셈	데이터 표본수
주파수 추정	$f_{Kaiser}(n)$ (식(4))	4	6	4
	$f_{Diff}(n)$ (식(13))	2	6	4
	$f_{Prony}(n)$ (식(16))	4	7	4
	$f_{MCOV}(n)$ (식(17))	5	8	5
진폭 추정	$a_{Kaiser}(n)$ (식(5))	6	9	4
	$A_{Diff}(n)$ 식(14)	4	9	5
	RMS (식 (15))	N-1	N+1	N

4. 컴퓨터 시뮬레이션

4.1 전력선상 신호의 이상현상 검출 응용

이절에서는 본 논문에서 제안된 주파수와 진폭 추정 알고리즘의 유용성을 보이기 위한 응용 사례를 소개한다. 응용은 전력선상에서 발생할 수 있는 이상현상의 검출이다. 전력선상에서는 다양한 이상현상이 있을 수 있다. 대표적인 예로는 진폭의 증가(swell) 혹은 감소(sag), 최대값의 평탄화(flat top), 위상왜곡, 고조파왜곡 등이 있다 [6,10]. 본 절에서는 진폭추정 알고리즘과 주파수 추정 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 진폭의 증가와 감소가 포함된 신호를 실험한다. 신호는 변화의 순간에는 주파수가 역시 변화를 보일 것이다. 아래의 그림 1과 그림 2는 이러한 현상을 보인다. 그림상의 모든 신호는 0.1초에서 0.3초까지를 보인다. 신호의 주파수는 60Hz이며, 표본화 주파수는 2560 Hz를 사용하였다. 그림 1은 0.15초에 최대치에서 5% 감쇄된 후, 0.235초에 복구된 신호이다. 그림 1 (a)는 신호를 시간영역에서 보이며, 그림 1 (b), (c)는 각각 Kaiser방법 (식(4))에 의한 순간 주파수와 진폭 (식(5))을 보인다. 그림 1 (d), (e)는 본 논문에서 제안한 방법에 의한 순간주파수 (식(12))와 진폭추정 (식(13))을 보인다. 모든 방법이 0.15초와 0.235초에 이상 현상이 신호에 발생했음을 알려준다. 진폭추정 결과(그림 (c)와(e))로부터 진폭이 감소되었음을 알 수 있다.

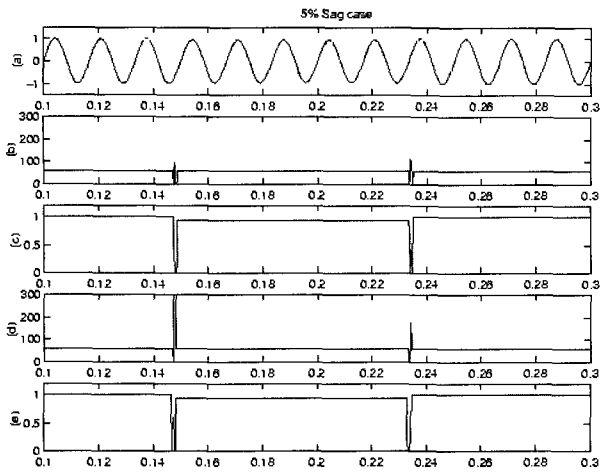


그림 1 5% Sag 신호의 분석 (a) Sag 신호 (b) Kaiser 순간 주파수 (c) Kaiser진폭 (d) 고차미분 순간주파수 (e) 고차 미분 진폭추정

Fig. 1 Instantaneous frequency analysis of 5% sag signal (a) sag signal (b) Kaiser's Instantaneous frequency (c) Kaiser's amplitude (d) higher order differential instantaneous frequency (e) higher order differential amplitude

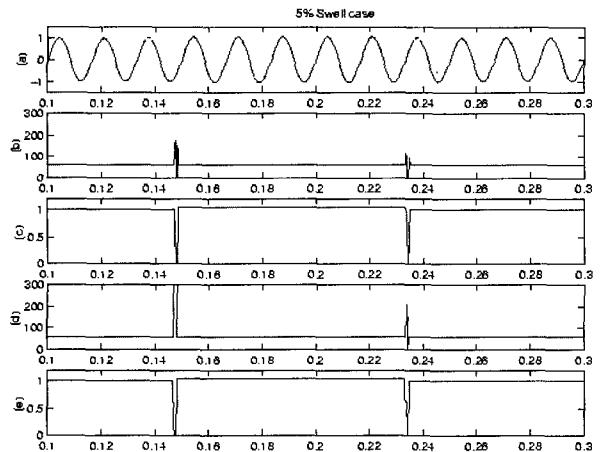


그림 2 5% Swell 신호의 분석 (a) Swell 신호 (b) Kaiser 순간 주파수 (c) Kaiser진폭 (d) 고차미분 순간주파수 (e) 고차 미분 진폭추정

Fig. 2 Instantaneous frequency analysis of 5% swell signal (a) swell signal (b) Kaiser's Instantaneous frequency (c) Kaiser's amplitude (d) higher order differential instantaneous frequency (e) higher order differential amplitude

그림 2.에서는 진폭의 증가를 Kaiser방법과 본 논문에서 제안한 방법으로 검출할 수 있음을 보인다. 그림 2 (c), (e)로부터 진폭의 증가를 확인할 수 있으며, 그림 2 (b)~(e)로부터 0.15초와 0.235초에서 이상현상이 발생했음을 검출할 수 있다. 이상의 실험에서 본 논문에서 제안한 주파수추정 및 진폭추정 알고리즘이 전력선 신호의 이상검출에 성공적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

4.2 주파수 추정 오차 성능 비교

이절에서는 순간주파수 추정기의 성능을 비교한다. 시험 신호는 AM-FM 변조된 신호로 다음과 같이 정의된다.

$$x[n] = a[n] \cos \left(\Omega_o n + \Omega_m \int_0^n q(m) dm + \theta \right)$$

여기에서 $a[n]$ 은 AM변조부분이고 Ω_o 는 반송파 주파수, Ω_m 은 FM 변조주파수이다. 이때 순간주파수는 다음과 같이 주어진다.

$$\Omega[n] = \Omega_o + \Omega_m q[n]$$

본 모의시험에서 Ω_m 과 $q[n]$ 은 $q[n]$ 이 1%씩 증가하여 Ω_o 의 20%까지 증가하도록 선택되었다. 그리고, 순간주파수 추정기의 주파수 추정능력에 관심이 있으므로 진폭은 편의상 고정된 값 $a[n] = 1$ 을 사용하였다. 순간주파수 추정기가 주파수를 추정할 때 발생하는 오류의 분산을 구하는 방식으로 다양한 순간주파수 추정기를 비교하였다. 결과는 그림 3와 같다. modified covariance 방법에 기초한 순간주파수 추정기가 Prony 방식의 순간주파수 추정기보다 나은 분산특성을 보인다. 아울러 Kaiser 방법에 비교해서도 다소 나은 결과를 보인다. 본 논문에서 제안한 고차의 미분연산자를 이용한 순간주파수는 국지적으로 성능이 Prony방법과 유사하지만 전반적으로 Modified covariance방법과 Kaiser방법의 중간 정도의 성능을 보인다.

4.3 진폭 추정 오차 성능 비교

이절에서는 순간진폭 추정기의 성능을 비교한다. 시험 신호는 진폭왜곡된 신호로 다음과 같이 정의된다.

$$x[n] = a[n] \cos(\Omega_o n + \theta)$$

여기에서 $a[n]$ 은 진폭부분으로 $a[n] = 1 + \alpha \cdot \cos(\Omega_1 n)$ 이고 α 는 0에서 최대 진폭의 20%인 0.2까지 2%씩 증가한다. Ω_o 는 반송파 주파수, Ω_1 은 진폭왜곡 주파

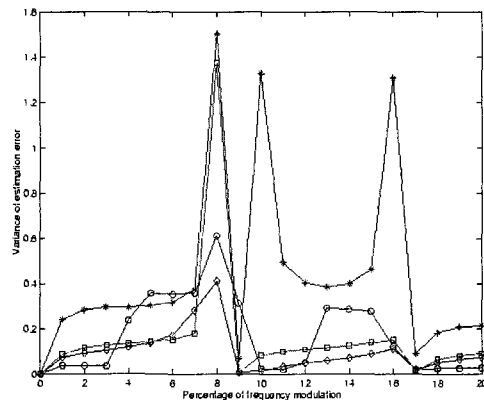


그림 3 주파수변조 신호의 주파수 추정시 오차의 분산값 분석. *: Prony, o: Kaiser, ◇: MCOV, □: 미분연산자를 이용한 방법

Fig. 3 Comparison of error variance in the frequency estimation of frequency modulated signal. *: Prony, o: Kaiser, ◇: MCOV, □: differential operator based method

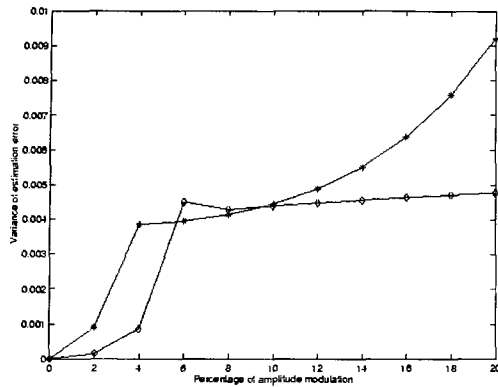


그림 4 진폭왜곡 신호의 진폭 추정시, 오차의 분산값 비교.
 ◇: Kaiser방법, *: 미분연산자를 이용한 방법
Fig. 4 Comparison of error variance in the amplitude estimation of amplitude modulated signal. ◇: Kaiser, *: differential operator based method

수로 반송파 주파수의 20%로 가정한다. 순간진폭 추정기가 진폭을 추정할 때 발생하는 오류의 분산을 구하는 방식으로 Kaiser의 순간진폭 추정기와 본 논문에서 제안한 순간진폭 추정기를 비교하였다. 아래 그림 4는 Kaiser 진폭 추정기와 본 논문에서 제안한 미분에너지를 이용한 진폭 추정기의 추정 오류의 분산 특성을 보인다. 전반적으로 Kaiser의 순간진폭 추정기에 비교해서 오차의 분산특성이 열세에 있다. 다만 6~10%의 진폭 변조 영역에서만 Kaiser 순간진폭 추정기와 유사한 성능을 보인다. 따라서 계산량의 절감을 제외하면 기존의 방법에 비교해서 큰 장점이 없음을 알 수 있다. 다만 통상 전력선상에서의 진폭 왜곡이 10% 이내라는 점을 고려하면, 제안된 진폭 추정법이 Kaiser 순간진폭 추정기 만큼 유용하다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 고차의 미분 에너지함수를 이용하여 이산 정현파신호의 진폭 성분과 주파수성분을 분리 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법은 기존의 유사한 방법과 비교하여 계산량 측면에서 유리하다. 진폭추정의 경우 기존 진폭 추정방법에 비교해서 약간의 우월성을 보이거나 데이터를 더 필요로 하며, RMS 실효치와 비교해서는 우월한 특성을 보인다. 순간주파수 추정의 경우 기존의 방법보다는 우월성을 보인다. 제안된 진폭 및 순간주파수 추정 방법이 다양한 분야에 응용될 수 있음을 보였다. 예를 들어 전력선 신호의 이상현상을 검출하기 위하여 본 논문에서 제안된 진폭추정기와 순간주파수 추정기를 이용할 수 있다. 시뮬레이션 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 순간주파수 추정으로 이상현상의 발생시점을 검출하고 진폭추정으로 진폭의 감쇄 혹은 증가 정도를 분석할 수 있음을 보였다. 아울러, 제안된 진폭 및 주파수 추정기와 기존의 진폭 및 주파수 추정기의 오차분산 성능을 진폭 혹은 주파수 왜곡 환경에서 비교하였다. 진폭추정기의 경우 기존의 진폭추정기에 비교해서 오차분산 성능이 열세에 있다. 그러나 주파수 추정기는 modified covariance방법과 유사한 오차분산 성능을 보인다.

참 고 문 헌

- [1] F. Hlawatsch and G. F. Boudreaux-Bartels, "Linear and quadratic time-frequency signal representations," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 19, pp. 21-67, Apr. 1992.
- [2] B. Boashash, "Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal-Part 2: algorithms and applications," Proc. of the IEEE, vol. 80, pp. 540-568, Apr. 1992.
- [3] P. Maragos, J. F. Kaiser, and T. F. Quatieri, "On amplitude and frequency demodulation using energy operators," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 41, pp. 1532-1550, Apr. 1993.
- [4] P. Maragos, J. F. Kaiser, and T. F. Quatieri, "Energy separation in signal modulations with application to speech analysis," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 41, pp. 3024-3051, Oct. 1993.
- [5] H. M. Teager, "Some observations on oral air flow during phonation," IEEE Trans. Acoustics, Speech Signal Processing, vol. 28, no. 5, pp. 599-601, Oct., 1980.
- [6] B. Iem, "Instantaneous Frequency Estimators as Voltage Disturbance Detectors," Proc. of 2006 IEEE Power Systems Conference and Exposition, pp. 2225-2228, Oct. 2006.
- [7] P. Maragos, and A. Potamianos, "Higher order differential energy operators," IEEE Signal Processing Letters, vol. 2, pp. 152-154, Aug. 1995.
- [8] A. A. Sagle and R. E. Walde, Introduction to Lie Groups and Lie Algebras, Academic Press, 1989.
- [9] L. B. Fertig and J. H. McClellan, "Instantaneous frequency estimation using linear prediction with comparisons to the DESAs," IEEE Signal Processing Letters, vol. 3, pp. 54-56, Feb. 1996.
- [10] S. Santoso, E. J. Powers, and W. M. Grady, "Electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis," in Proc. 1994 IEEE TF/TS Analysis Symposium, pp. 166-169, 1994.

저 자 소 개



임 병 관 (林炳寬)

1965년 4월 3일생.
 1988년 연세대 전자공학과 졸업
 1998년 Univ. of Rhode Island 전기공학과 졸업(공학박사)
 1999년~2002년 삼성전자
 2002년~현재 강릉대 전자공학과 조교수
 Tel : 033-640-2426
 Fax : 033-646-0740
 E-mail : ibg@kangnung.ac.kr