

## 論文

## Teager 에너지를 이용한 GPS 위성 시계 도약 검출

허윤정\*, 조정호\*, 허문범\*

## Detection of GPS Clock Jump using Teager Energy

Youn-Jeong Heo\*, Jeongho Cho\* and Moon-Beom Heo\*

## ABSTRACT

In this paper, we propose a simple technique for the detection of a frequency jump in the GPS clock behavior. GPS satellite atomic clocks have characteristics of a second order polynomial in the long term and a non-periodic frequency drift in the short term, showing a sudden frequency jump occasionally. As satellite clock anomalies influence on GPS measurements, it requires to develop a real time technique for the detection of the clock anomaly on the real-time GPS precise point positioning. The proposed technique is based on Teager energy which is mainly used in the field of various signal processing for the detection of a specific signal or symptom. Therefore, we employed the Teager energy for the detection of the jump phenomenon of GPS satellite atomic clocks, and it showed that the proposed clock anomaly detection strategy outperforms a conventional detection methodology.

## 초 록

본 논문에서는 GPS 위성시계의 갑작스런 주파수 도약이 발생하였을 때 이를 즉시 검출할 수 있는 기법을 제시한다. GPS 위성은 정밀 위치와 시각 정보를 제공하기 위해 원자시계를 장착하고 있으나, 위성 원자시계는 장기적으로는 이차 함수의 형태를, 단기적으로는 주기가 일정치 않은 주기함수의 형태를 보이면서 가끔씩 신호에 갑작스런 도약 현상이 발생한다. 위성 시계의 이상 현상은 GPS 측정치에 큰 오차를 수반하기 때문에, 실시간 정밀 위치 응용분야에서는 위성시계 이상 신호를 즉시 검출할 수 있는 기법이 요구된다. 이를 위해 다양한 신호처리 분야에서 특정한 신호를 검출하는데 활용되고 있는 Teager 에너지를 적용하였으며, 그 결과 시계 도약 현상을 효과적으로 검출할 수 있었고, 일반적인 위성시계 도약 검출 기법과의 비교를 통해 제시한 기법의 유용성을 확인하였다.

**Key Words** : GPS Clock(GPS 위성시계), Teager Energy(Teager 에너지), Teager-Kaiser Operator(Teager-Kaiser 연산자), Clock Anomaly(시계 이상), Frequency Jump(주파수 도약)

## 1. 서 론

GNSS (Global Navigation Satellite System) 위성은 정밀 시각과 위치 정보를 제공하기 위해 원자시계를 장착하여 신호를 생성하고 있다. 그러나 위성 원자시계는 경년(aging) 현상으로 인해 시간이 지남에 따라 주파수 드리프트가 발생하여

† 2009년 9월 3일 접수 ~ 2009년 12월 4일 심사완료

\* 정회원, 한국항공우주연구원 위성항행항법팀

교신저자, E-mail : yjheo@kari.re.kr

대전광역시 유성구 과학로 115번지

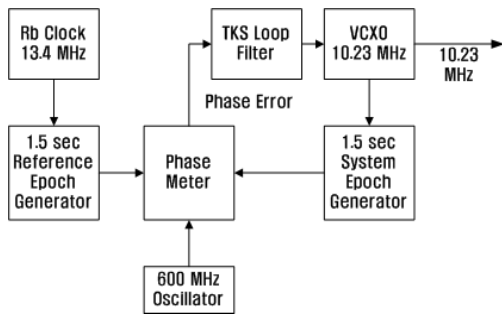


그림 1. TKS block diagram

GPS 시각에 대한 바이어스가 존재하게 된다. 따라서 MCS (Master Control Station)에서는 매일 위성 시계의 위상, 주파수, 주파수 드리프트를 업로드하여, 사용자가 정확한 시각과 위치를 얻을 수 있도록 위성 시계 보정 정보를 항법 메시지를 통해 제공하고 있다[1].

위성 원자시계는 주파수 드리프트뿐만 아니라 가끔씩 주파수 도약 현상이 발생하기도 한다. 주파수 도약 현상은 MCS의 장비 제어 명령에 의한 것과 위성 장비 특성에 의한 영향으로 나타날 수 있다[2][3]. 그림 1은 GPS Block IIR 위성의 TKS (Time Keeping System)를 나타낸 것으로, 루비듐(Rb) 원자시계와 VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator)로부터 생성된 신호를 위상계가 비교하여 위상 오차가 일정 범위 내(<16 ns)에 있으면 표준 코드를, 그 이상이 되면 비정상 코드(non-standard code)를 발생시켜 사용자가 이용할 수 없도록 하고 있다[4].

그러나 주파수 도약 현상이 발생하여도 비정상 코드가 생성되지 않는 경우가 종종 있다[5]. 이런 원자시계의 주파수 도약 현상을 검출하기 위한 다양한 기법들이 연구되고 있으나, 대부분의 기법들은 평균값을 이용하여 도약 유무를 판단하기 때문에 검출이 느리고 도약 유무를 알 수 있으나 도약 위치를 찾지 못하는 방법도 있다 [6-8]. 특히, 주파수 도약 검출의 고전적 방법인 CUSUM (Cumulative Sum)은 신호와 평균값과의 차이를 누적시켜 이의 기울기 변화를 관찰함으로써 주파수 도약 및 도약 위치를 검출하지만, 전체 평균값을 사용하기 때문에 검출 속도가 느리다[8]. 항공 분야와 같이 실시간으로 정밀 위치를 필요로 하는 응용분야에 이러한 기법들을 적용하기에는 한계가 있기 때문에, 효과적으로 위성 시계 도약을 검출할 수 있는 실시간 도약 검출 기법의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 위성 원자시계의 주기신호에

표 1. Types of satellite clocks as of August 2009

PRN	BLOCK	CLOCK	PRN	BLOCK	CLOCK
2	II-R	RB	18	II-R	RB
3	II-A	CS	19	II-R	RB
4	II-A	RB	20	II-R	RB
5	II-A	RB	21	II-R	RB
6	II-A	RB	22	II-R	RB
7	IIR-M	RB	23	II-R	RB
8	II-A	CS	24	II-A	CS
9	II-A	CS	25	II-A	RB
10	II-A	RB	26	II-A	RB
11	II-R	RB	27	II-A	CS
12	IIR-M	RB	28	II-R	RB
13	II-R	RB	29	IIR-M	RB
14	II-R	RB	30	II-A	CS
15	IIR-M	RB	31	IIR-M	RB
16	II-R	RB	32	II-A	RB
17	IIR-M	RB			

갑작스런 도약 현상이 발생하였을 경우, 이러한 현상을 즉시 검출할 수 있도록 Teager 에너지 기법을 적용하고자 한다. Teager와 Kaiser [9]에 의해 처음으로 소개된 Teager 에너지는 신호의 에너지를 측정하기 위한 비선형 연산자로서, 음성인식, 영상처리 등 여러 응용 분야에서 신호 처리를 위해 이용되고 있으나[10-12] 구체적으로 위성시계 주파수 도약 현상 검출에 사용된 예는 없다. 위성 시계는 계속적으로 일정한 주파수를 발생시키지만, 주파수 드리프트뿐만 아니라 갑작스런 도약 현상 등 여러 가지 성향이 복합적으로 존재하므로, Teager 에너지 연산자를 적용함으로써 에너지 함수로 간단하게 표현할 수 있다. 신호를 에너지로 변환하게 되면 신호의 특성을 정량적으로 표현할 수 있어 신호 비교 시 유용한 방법으로 활용될 수 있고, 일반 에너지는 신호 크기만을 적용하는 반면, Teager 에너지는 진폭과 주파수를 모두 고려하기 때문에 진폭 및 주파수 변화에 따른 정확한 에너지 변화를 확인할 수 있다. 따라서 주파수 변화가 있는 원자시계 신호에 Teager 에너지를 적용하면 원자시계 특성인 주파수 도약 현상을 검출하는데 용이할 것으로 사료된다.

위성 원자시계의 갑작스런 도약 현상을 효과적으로 검출할 수 있는 기법을 제안하고자, 2장에서는 현재 사용 중인 GPS 위성시계의 종류 및 특성에 대해 살펴보고, 3장에서는 Teager 에너지를 이용한 원자시계 도약 검출 기법 및 시험 결과를 기술한다.

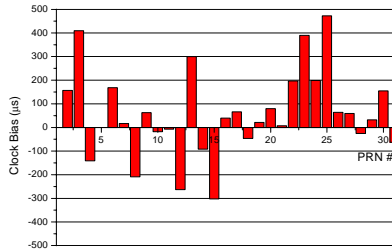


그림 2. GPS clock bias (2009. 6. 21)

## II. GPS 위성 시계 특성

현재 운영 중인 GPS 위성 원자시계들의 종류에 대해 살펴보고 원자시계의 주파수 드리프트와 주파수 도약의 특성에 대해 다루고자 한다.

### 2.1 GPS 위성시계 드리프트

GPS 위성은 정확한 위치와 시각 정보를 제공하기 위해 정밀 원자시계를 탑재하고 있고, 고장 시 대비를 위한 2~3대의 여분의 세슘과 루비듐 원자시계를 보유하고 있다. 표 1에 현재 각 위성들이 신호 생성을 위해 사용하고 있는 주 원자시계를 나열하였으며, RB는 루비듐, CS는 세슘 원자시계를 의미한다.

세슘과 루비듐 원자시계는 모두 시간이 지남에 따라 드리프트 현상이 발생하여 기준 시각 척도와 바이어스가 생성된다. 그림 2는 기준 시각에 대한 위성 시계 바이어스를 나타낸 것으로, 각 위성 시계들은 기준 시각 IGST (IGS Time)에 대해 수 십~수 백  $\mu\text{s}$  바이어스가 있음을 알 수 있다. 그림 3은 각 위성별 초기 바이어스를 0으로 가정하고 7일 동안의 위성 시계 드리프트 정도를 나타낸 것이다. 대부분의 위성 시계는  $\pm 5$

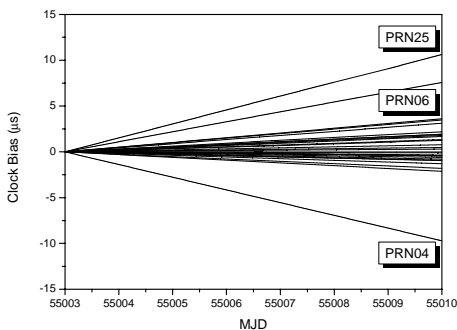


그림 3. GPS clock drift behavior

$\mu\text{s}$  이내에서 드리프트가 존재하는 반면, PRN04, PRN06, PRN25 위성 시계는 다른 시계들에 비해 드리프트 변화율이 2배 이상 됨을 알 수 있다. 이러한 드리프트 변화율이 큰 위성 시계는 안정도가 낮아 도약 현상 등 향후 문제가 될 가능성이 높다. 세 시계 모두 Block II-A 위성에 장착된 루비듐 원자시계이다.

### 2.2 GPS 위성시계 도약

위성 원자시계는 드리프트 현상뿐만 아니라 갑작스런 도약 현상이 발생하기도 한다. 도약 현상은 그림 4와 같이 MCS에 의한 위성 시계 제어 명령으로 인해 수 백  $\mu\text{s}$  도약이 발생할 수 있고, 그림 5와 같이 수  $\text{ns}$ 의 도약이 나타나는 경우도 있다. 그림 4와 같이 장비의 교체 및 수리 등으로 인한 도약의 경우는 사용자들에게 미리 예고가 되고 있어 문제가 되지 않으나, 그림 5와 같이 장비의 고장이나 하드웨어의 문제로 인해 생기는 갑작스런 도약의 경우는 이러한 현상이 나타난 후에 보고가 되거나, 또는 종종 보고가 되지 않는 경우도 있다. 이러한 예기치 않은 도약 현상은 GPS 측정치에 영향이 미치게 되고 정밀 위치를 필요로 하는 실시간 응용분야에서

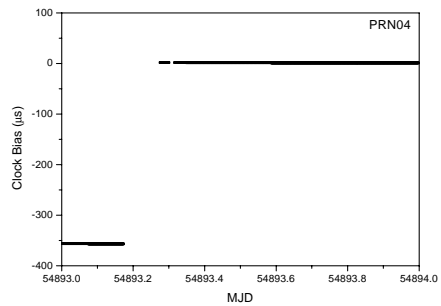


그림 4. PRN04 clock jump (2009. 3. 3.)

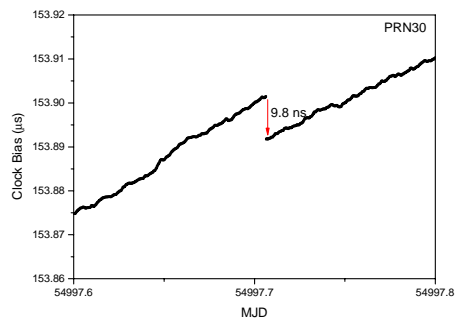


그림 5. PRN30 clock jump (2009. 6. 21.)

이런 신호를 검증 없이 사용하게 되면 매우 치명적인 오차를 수반하게 된다. 따라서 본 연구에서는 드리프트와 도약 현상을 동시에 수반한 위성 시계 자료로부터 즉시 도약 검출이 가능한 기법을 제안하고자 한다.

### III. Teager 에너지

Teager와 Kaiser는 단일 성분으로 연속적으로 진동하는 신호의 에너지를 측정하기 위해 비선형 연산자를 제안하였는데, 식(1)는 연속시간에 대한, 식(2)는 이산시간에 대한 에너지 연산자를 나타낸 것이다[13].

$$E_C[x(t)] = \dot{x}^2(t) - x(t)\ddot{x}(t) \quad (1)$$

$$E_D[x(n)] = x^2(n) - x(n-1)x(n+1) \quad (2)$$

탄성계수  $k$ 에 의해 운동하고 있는 질량  $m$ 인 물체는 식(3)과 같이 간단한 진동식으로 표현할 수 있다.

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi) \quad (3)$$

여기서,  $A$ 는 진폭,  $\omega$ 는 각주파수로  $(k/m)^{1/2}$ 와 같고,  $\phi$ 는 초기 위상이다.

운동에너지와 위치에너지의 합인 총 에너지 식(4)에 운동 방정식 식(3)을 대입하면 식(5)을 얻을 수 있고 진동하는 물체의 총 에너지는 진폭과 각주파수의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

$$E = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}^2 \quad (4)$$

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \approx \omega^2 A^2 \quad (5)$$

$x(n)$ 을 진동하는 물체의 운동을 표현한 신호의 샘플이라고 하면, 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$x(n) = A\cos[\Omega n + \phi] \quad (6)$$

$$x(n-1) = A\cos[\Omega(n-1) + \phi]$$

$$x(n+1) = A\cos[\Omega(n+1) + \phi]$$

식(6)에서 3개의 상수  $A, \Omega, \phi$ 가 있는데, 3개의 샘플을 조합하여 식(7)과 같이 이들 값을 결정할 수 있다.

$$x^2(n) - x(n+1)x(n-1) = A^2\sin^2(\Omega) \approx A^2\Omega^2 \quad (7)$$

임의의 단일 성분 신호의 에너지는 식(5)과 같이 진폭과 주파수의 제곱에 비례하므로, 식(7)을 다시 쓰면 식(8)과 같이 주기성을 갖는 신호의 에너지는 신호의 제곱과 전후 곱의 차를 통해 계산할 수 있다.

$$E(n) = x^2(n) - x(n+1)x(n-1) \quad (8)$$

이산시간에 대한 Teager 에너지 연산자를 위성 시계 측정 자료에 적용하여 에너지 변화를 관찰함으로써, 주파수 도약과 같이 주기 신호에 변화가 발생하였을 때 즉시 그 현상을 찾아 낼 수 있다.

### IV. 위성 시계 도약 검출

위성시계 도약 검출을 위한 위성 시계 자료 수집을 위해 IGS (International GNSS Service)에서 제공하고 자료를 활용하였다. IGS는 8 개의 분석센터로부터 받은 자료로부터 가중치 평균을 적용하여 각 위성과 각 관측소의 시각 정보를 생성하고 제공하고 있는데, IGS에서 생성된 정밀한 시각 정보는 GPS 시각에 대해 선형으로 조율된 IGS 시각을 기준으로 결정된 것으로 본 연구에서는 CLOCK RINEX 형식으로 된 30초 간격의 위성 시각 정보를 사용하였다[14].

그림 5는 2009년 6월 21일 PRN30 위성의 바이어스를 나타낸 그림으로, 하루 동안 약 250 ns의 드리프트가 있고 MJD 54997.71 부근에서 약 9.8 ns의 도약 현상이 있다. 하루 동안 위성 시계에 대한 Teager 에너지를 계산한 결과가 그림 6과 같다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 도약 현상이 발생한 부분에서 다른 값들에 비해 변화폭이 큰 에너지 결과를 관찰할 수 있다.

CUSUM은 일반적으로 원자시계 주파수 변화 검출에 활용되고 있는 기법으로 식 (9)과 같이

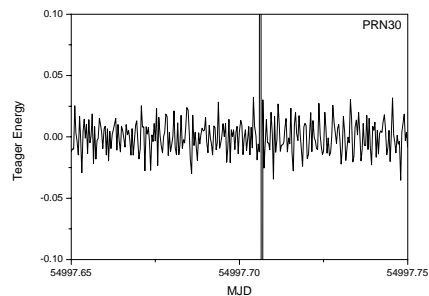


그림 6. Teager energy results of PRN30 clock

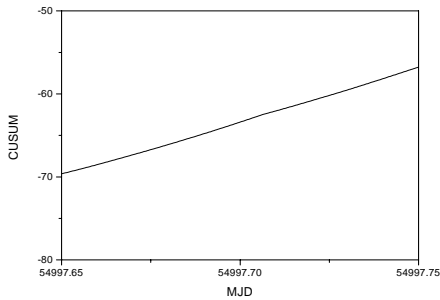


그림 7. CUSUM results of PRN30 clock

전체 자료의 평균값에 대한 차이를 누적시켜 기울기 변화가 일어나는 곳에서 주파수 변화를 검출한다.

$$S_i = S_{i-1} + (y_i - \bar{y}) \quad (9)$$

그림 7은 CUSUM을 적용한 결과로서, 도약 현상이 있는 부분에서 기울기 변화가 있어야 하나, 변화를 발견할 수 없었다. CUSUM의 경우는 드리프트 변화가 도약에 비해 너무 크면 위성 시계 자료로부터 도약 현상을 바로 검출할 수 없고, 2차 다항식으로 드리프트 현상을 제거 후 남은 잔차를 통해 도약 현상을 검출할 수 있었다. 반면, Teager 에너지 기법은 위성 시계 드리프트 효과를 제거하는 번거로움 없이 신속하게 변이 검출이 가능하였다.

그림 8은 2009년 6월 3일 (MJD 54985)부터 22일 (MJD 55004) 20일 동안의 PRN25 위성 시계 드리프트와 도약 검출 결과를 보여주고 있다. 이 위성시계의 경우 드리프트 크기가 커서 도약 현상이 있는지 바이어스 (a) 만으로는 알 수 없지만, 드리프트 효과를 제거한 (b)를 통해 MJD 5500일에 도약 현상이 있음을 알 수 있고, (c)와 같이 Teager 에너지를 통해서 도약 현상이 일어난 부분을 찾을 수 있었다. 2009년 5월 29일 (MJD 54980)부터 2009년 6월 27일(MJD 55009)까지 30일 동안 PRN02 위성부터 PRN32 위성에 대해서 시험을 진행하였으며, PRN25과 PRN30 위성을 제외한 나머지 위성에서는 이와 같은 시계 도약 현상이 존재하지 않음을 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

IGS로부터 제공된 정밀 위성 시각정보에 Teager 에너지 기법을 적용하여 위성시계 도약

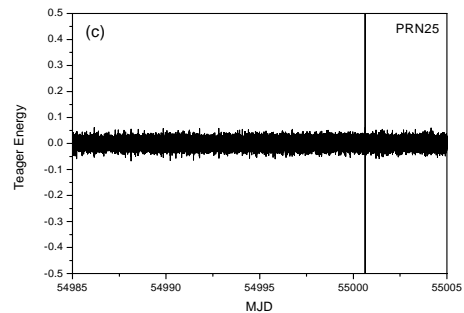
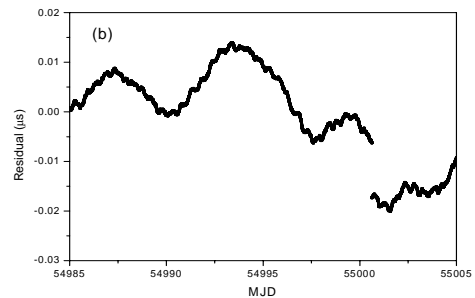
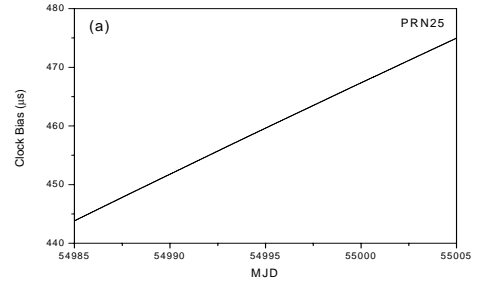


그림 8. Detection of PRN25 clock jump

현상을 효과적으로 검출할 수 있었다. 하루에 수십 ~ 수 백 ns 정도 흐르는 위성 시계 신호로부터 수 ns 정도의 갑작스런 도약 현상이 일어났을 때 Teager 에너지 기법은 위성 시계 드리프트 효과를 제거하는 번거로움 없이 신속하게 도약 검출이 가능한 반면, 주파수 도약 검출에 흔히 사용하는 방법인 CUSUM 적용 시에는 드리프트 변화가 도약에 비해 너무 커서 도약 현상을 바로 검출할 수 없었고, 드리프트 효과를 제거 하고 남은 잔차를 통해 도약 검출이 가능하였다.

IGS 정밀 위성 시계 정보는 가장 정확한 위성 시계 정보라고 할 수 있지만, 13일 이후에 사용할 수 있기 때문에, 실시간으로 위성 시계 도약 검출 기법을 적용하기 위해서는 수신기에서 획득

한 관측 자료를 활용하여 위성 시계 정보를 추출할 수 있는 연구가 추후 수행되어야 한다.

항공기 이착륙과 같이 실시간으로 정밀 위치 결정을 필요로 하는 응용분야에서는 위성 시계의 갑작스런 변이 현상은 큰 오차의 원인이 되므로, RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring)이나 WAAS (Wide Area Augmentation System) 또는 LAAS (Local Area Augmentation System)와 같이 실시간으로 위성 이상 신호를 감지하고 이를 보강해 줄 수 있는 기술들이 개발되어 수행되고 있으나, 위성 이상 신호의 검출 능력을 높이고, 빠른 시간 내에 대처할 수 있는 기술들이 계속적으로 요구되고 있다. 본 연구를 통해 실시간 위성 시계 이상 검출을 위한 Teager 에너지 기법의 적용 가능성을 확인할 수 있었고, 향후 이를 실시간 응용분야에 적용하기 위한 연구로 확장할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 기초기술연구회의 지원으로 수행한 "위성항법시스템 활용을 위한 무결성 감시기법 기초연구"의 연구 결과 중 일부입니다.

## 참고문헌

- 1) Hutsell, S. T., "Fine Tuning GPS Clock Estimation in the MCS", Proceedings of the 26th PTTI Meeting, 1995, pp. 63~74.
- 2) Epstein, M. and Dass, T., "Management of Phase and Frequency for GPS IIR Satellites", Proceedings of the 33rd PTTI Meeting, 2001, pp. 481~492.
- 3) Wu, A., "Investigation of the GPS Block IIR Time Keeping System Anomalies Caused by the VCXO", Proceedings of the 31st PTTI Meeting, 1999, pp. 55~64.
- 4) Doss, T., Petzinger, J., Rajan, J., and Rawicz, H., "Analysis of On Orbit Behavior of Block II-R Time Keeping System", Proceedings of the 30th PTTI Meeting, 1998, pp. 173~186.
- 5) Wu, A., "Evaluation of GPS Block IIR

Time Keeping System for Integrity Monitoring", Proceedings of the 39th PTTI Meeting, 2007, pp. 351~362.

6) Galleani, L. and Tavella, P., "Detection and Identification of Atomic Clock Anomalies", Metrologia, Vol. 45, 2008, pp. 127~133.

7) Nunzi, E., Galleani, L, Tavella, P., and Carbone, P., "Detection of Anomalies in the Behavior of Atomic Clocks", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 56, No. 2, 2007, pp. 523~528.

8) Riley, W. J., "Algorithms for Frequency Jump Detection", Metrologia, Vol. 45, 2008, pp. 154~161.

9) Kaiser, J. F., "On a Simple Algorithm to Calculate the Energy of a Signal", Proceedings of the 1990 International Conference, Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990, pp. 381~384.

10) Hanson, M. A., Powell, H. C., Frysinger, R.C., Huss, D. S., Elias, W. J., Lach, J., and Brown, C. L., "Teager Energy Assessment of Tremor Severity in Clinical Application Wearable Inertial Sensors", Proceedings of the Life Science Systems and Applications Workshop, 2007, pp. 136~139.

11) Hamila, R., Renfors, M., Gabbouj, M., and Astola, J., "Time-Frequency Signal Analysis using Teager Energy", Proceedings of the 4th International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 1997, pp. 911-914.

12) 남명우, 이재주, 박재형, 노승용, "개선된 Teager 에너지 측정방식을 이용한 한국어 마찰음과 파찰음 인식", 대한전자공학회 학술발표회, 제 15권 1호, 1993, pp. 23-26.

13) Maragos, P., "On Amplitude and Frequency Demodulation Using Energy Operators", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 41, No. 4, 1993, pp. 1532-1550.

14) Senior, K., Koppang, P., Matsakis, D., and Ray, J., "Developing an IGS Time Scale", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 40, 2003, pp. 585-593.