초소형 기지국에서 타이밍 품질 향상을 위한 PDV 제어 방안

The study on effective PDV control for IEEE1588

김 현 수*, 신 준 효*, 김 정 훈*, 정 석 종*

Hyun-Soo Kim*, Jun-Hyo Shin, Jung-Hun Kim, and Seok-Jong Jeong

Abstract

Femtocells are viewed as a promising option for mobile operators to improve coverage and provide high-data-rate services in a cost-effective manner. Femtocells can be used to serve indoor users, resulting in a powerful solution for ubiquitous indoor and outdoor coverage. TThe frequency accuracy and phase alignment is necessary for ensuring the quality of service (QoS) forapplications such as voice, real-time video, wireless hand-off, and data over a converged access medium at the femtocell.

But, the GPS has some problem to be used at the femtocell, because it is difficult to set-up, depends on the satellite condition, and very expensive.The IEEE 1588 specification provides a low-cost means for clock synchronisation over a broadband Internet connection.The Time of Packet (ToP) specified in IEEE 1588 is able to synchronize distributed clocks with an accuracy of less than one microsecond in packet networks. However,the timing synchronization over packet switched networks is a difficult task because packet networks introduce large and highly variable packet delays. This paper proposes an enhanced filter algorithm to reduce ths packet delay variation effects and maintain ToP slave clock synchronization performance. The results are presented to demonstrate in the intra-networks and show the improved performance case when the efficient ToP filter algorithm is applied.

Keywords: Timing, Synchronization, IEEE 1588, PTP, ToP, Delay variation,

I. 서 론

펨토셀 (Femtocell)은 그림 1과 같이 가정이나 사무실 등 실내에서 사용되는 초소형 이동통신용 기지국으로서, 이동전화와 인터넷을 연결하여 저렴한 비용으로 유무선 융합 서비스를 제공한다. 기존 이동통신의 경우 옥외 이동 시 사용하기 위한 통신서비스로 실내 커버리지를 중요하게 생각하지 않았으나 유무선 대체와 함께 이동전화의 실내이용이 점차 증가함에 따라 실내 커버리지 확대가 중요한 이슈가 되고 있다. 일반적으로 실내 커버리지를 위한 기지국 설치가 통화량에 비해 비용이 많이 들지만 펨토셀의 경우 상대적으로 비용이 저렴하여 유무선 융합 서비스 제공을 위한 차세대 무선 기술로 떠오르고 있다. 하지만, 펨토셀을 상용화 하기 위해서는 아직도 해결해야 할 기술적, 정책적 과제들이 많이 남아 있으며 대표적인 기술적 선결 과제중의 하나가 표 1에서와 같이 기존 이동통신 시스템에서 요구하는 주파수 및 위상의 정확도를 제공하여야 한다는 것이다.

기존의 이동통신 시스템은 지역적으로 떨어진 기지국 사이의 주파수 및 위상을 동기 시키기 위하여 GPS (Global Positioning System)위성으로부터 받은 타이밍 정보를 이용하였다. 하지만, 기존 GPS수신기는 낮은 수신감도, 많은 TTFF (the position-Time to First Fix) 시간소요, 높은 전력소모, 높은 가격 등의 문제점을 가지고 있다. 더욱이, 펨토셀의 경우 기존 매크로 기지국과 달리 건물 내에 위치하는 경우가 많고, 특히 건물이 밀집된 도심의

접수일자 : 2009년 7월 21일
최종완료 : 2009년 7월 24일
*LG-NORTEL Access Network Team
교신저자, E-mail : bluesman@lg-nortel.com

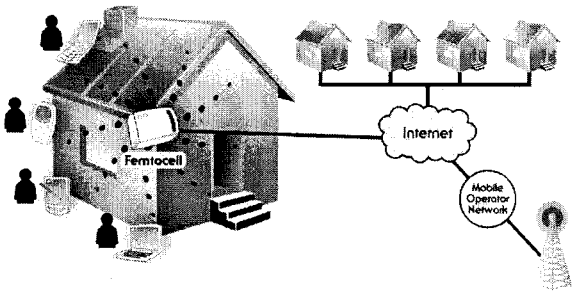

그림 1. 펨토셀의 개념도

표 1. 이동통신 표준에 따른 타이밍 요구사항

	Frequency Accuracy	Phase Accuracy
GSM	50ppb	NA
WCDMA	50ppb	NA
TD-SCDMA	50ppb	3us
CDMA2000	50ppb	3us
WIMAX FDD	50ppb	NA
WIMAX TDD	50ppb	1us
LTE	50ppb	TBD

건물 내에 설치될 수도 있기 때문에 기존 이동통신 시스템에서 사용하는 GPS위성신호 수신방안을 사용할 경우 성능 향상을 위하여 펨토셀을 창문 가까이에 설치하거나 고성능의 GPS 안테나를 창문 가까이에 설치해야 하는 제약사항이 발생하게 된다. 이러한 이유로 펨토셀의 타이밍 동기를 위하여 여러 방안들이 논의되고 있으며, 대표적인 기술이 패킷 네트워크에서 타이밍 패킷을 전송하여 동기를 맞추는 IEEE 1588이 있다. 하지만, IEEE 1588은 실내환경에 적합하고 저가격이라는 장점을 가지고 있지만 패킷 네트워크의 구성에 따라서 타이밍 패킷의 지연이 발생될 수 있으며, 이는 타이밍 정보를 추출하여 동기를 맞추는 과정에서 정확도가 떨어진다는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 IEEE 1588 및 패킷 네트워크의 특성을 분석하여, 타이밍 정확도에 심각한 영향을 미치는 패킷 지연 변화를 효과적으로 처리할 수 있는 알고리즘 및 구성을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 IEEE 1588의 타이밍 동기방안에 대해서 살펴보고, III장에서는 패킷 지연 변화를 실제 망에서 측정하여 특성을 분석한다. 제 IV장에서 분석된 패킷 지연 변화를 효율적으로 처리할 수 있는 알고리즘을 제안하고, 제 V장에서는 제안된 알고리즘을 실제 구현하여 측정한다. 마지막 제 VI장에서는 결과를 분석하며 향후 개선방향을 모색함으로써 본 연구에 대한 결론을 맺는다.

II. Overview of IEEE1588

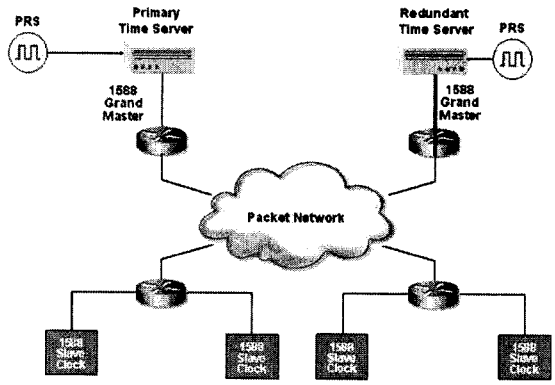

그림 2. IEEE1588 구성

IEEE 1588은 그림 2와 같이 네트워크의 모든 노드(Node)에 타이밍 패킷을 송신하는 마스터 (Master)와 마스터로부터 수신한 타이밍 패킷을 이용하여 마스터의 클럭에 동기를 맞추는 슬레이브 (Slave)로 구성이 된다. 마스터와 슬레이브는 그림 3에 나와 있는 것과 같이 두 단계의 과정을 통해서 동기를 맞추게 된다. 첫 번째 단계는 마스터와 슬레이브 간의 타임차 (Time Difference)를 보정하는 오프셋 보정(Offset correction)과정이다. 이를 위해서 마스터는 주기적으로 동기 메세지 (Synchronization Message)인 SYNC 메세지를 슬레이브로 전송한다. 이때 마스터는 SYNC 메시지의 전송시간을 하드웨어적으로 측정하여, 측정된 시간을 Follow-Up 메시지를 통해 슬레이브로 전송함으로써 정확한 시간을 제공한다. 이후 슬레이브는 마스터가 보낸 SYNC 메시지의 수신 시간과 Follow-up 메시지에 담긴 SYNC 메시지의 송신시간과의 차를 계산함으로써 오프셋을 보정하게 된다.

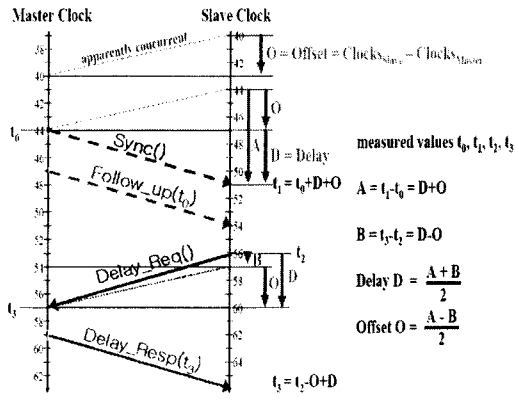

그림 3. IEEE1588 Timing message sequence

두 번째 단계는 마스터와 슬레이브간의 전송지연(delay)의 측정하는 과정이다. 이를 위해 슬레이브는 Delay Request 메시지를 마스터로 전송하며, 마스터는 Delay Request 메시지의 수신 시간을 측정하여 Delay Response 메시지를 통해 슬레이브로 전송한다. 슬레이브는 Delay Request 메시지의 수신시간과 송신시간의 차를 계산함으로써 전송지연을 구할 수 있다. 이를 수식으로 정리하기 위하여 마스터가 SYNC 메시지를 전송한 시간을 t0, 슬레이브가 SYNC 메시지를 수신한 시간을 t1, 슬레이브가 Delay Request 메시지를 전송한 시간을 t2, 마스터가 Delay Request 메시지를 수신한 시간을 t3라 했을 때, 오프셋 시간 및 전송 지연 시간은 다음과 같다.

$$\text{오프셋 시간} = [\,(t1 - t0) + (t3 - t2)\,] / 2 \quad (1)$$

$$\text{전송지연 시간} = [\,(t1 - t0) - (t3 - t2)\,] / 2 \quad (2)$$

하지만, 마스터와 슬레이브 간에는 메시지의 전송 지연 시간이 일정하지 않고, 네트워크의 구성의 변화, 지터 (Jitter), 스위치(Switch) 및 라우터 (Router)의 큐잉지연 (Queuing Delay)이 발생하기 때문에 시간에 따른 전송지연 시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{전송지연 시간 } d(t) = \text{경로 지연} d + \text{전송 지연 변동 PDV}(t)$$

마스터와 슬레이브 간의 전송지연 시간이 일정하다면, 마스터와 슬레이브 간의 타이밍 동기는 한 번의 메시지 교환으로도 이루어 질 수 있다. 하지만, 전송 지연 변동에 의해 전송 지연시간이 스토캐스틱(Stochastic)한 특성을 나타내기 때문에 타이밍 동기를 맞추기 위해서는 사용된 네트워크의 특성을 분석하여 그 네트워크에 맞는 특별한 알고리즘 (Algorithm)을 사용할 필요가 있다.

III. 측정 및 망특성 분석

패킷 네트워크에서 발생하는 전송지연을 실제환경에서 발생하는 전송지연과 유사하게 측정하고, 정확한 측정을 위하여 아래와 같이 시험환경을 구성하여 시험하였다.

1. 네트워크 구성

IEEE 1588 마스터와 슬레이브 사이에 그림 4와 같이 스위치 (L2 Switch) 4대와 라우터 (Router) 1대의 연결을 구성

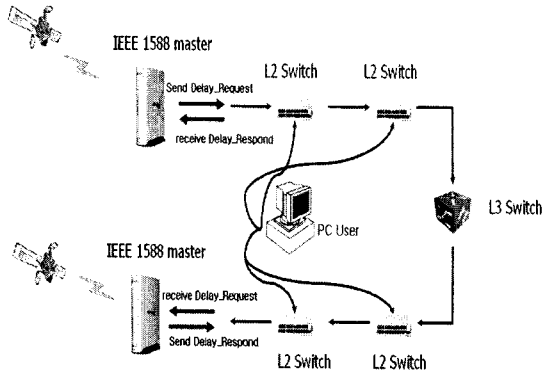

그림 4. network delay 측정 환경

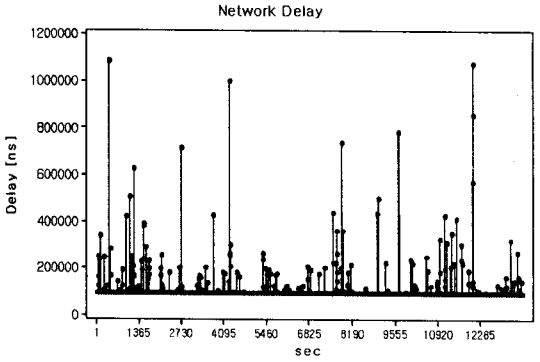

그림 5. Time Series plot of network delay

2. 랜덤패킷 발생

IEEE 1588 마스터와 슬레이브 사이의 패스 (Path)에 랜덤한 패킷에 의한 부하를 발생시킬 수 있는 각종 기기 및 PC를 연결

3. 측정정확도 향상

IEEE 1588 마스터와 슬레이브 사이의 경로에서 발생하는 전송지연만을 측정하기 위하여 마스터와 슬레이브에 GPS를 이용하여 동일한 시간 및 시각 정보 제공함으로써 순수한 전송지연만을 측정 가능한 환경 구성

4. 전송지연 측정방법

Delay Request 메세지 (IEEE 1588 마스터 IEEE 1588 슬레이브) 및 Delay Response 메세지 (IEEE 1588 마스터 IEEE 1588 슬레이브)를 이용하여 측정

5. 전송지연 계산방법

IEEE 1588 마스터와 슬레이브는 GPS에 타이밍 동기되어 있도록 구성하였으므로 둘 사이의 오프셋은 0임.

따라서, 마스터와 슬레이브 간의 전송지연은 송신시간과 수신시간의 차임 (전송지연 = Delay Request 메시지 수신시간 - Delay Request 메시지 송신시간)

그림 5는 위의 환경을 이용하여 측정된 전송지연을 시간에 따라 그래프로 나타낸 것으로서, 전송지연의 변화가 특정 패턴을 나타내는 것이 아니라 시간에 따라 랜덤하게 발생하며, 불규칙적으로 스파이크(Spike)성 전송지연이 발생됨을 알 수 있다. 측정된 전송지연이 어떠한 분포를 나타내는 지를 확인하기 위하여 그림 6에서 바 차트(Bar Chart)를 이용하였으며, 측정된 전송지연이 우측 하단의 타원 부분, 즉 스파이크성 지연변화를 제외하고는 대부분이 가우시안 분포 (Gaussian Distribution)를 나타냄을 보여준다. 측정된 네트워크 전송지연의 특징을 통계적으로 분석하기 위하여 평균, 표준편차, Peak To Peak 값으로 표 3에 나타내었으며, 계산된 값은 평균 (mean) = 96.281 us 및 표준편차 (Standard Deviation) = 24.098 us이며 Peak to Peak 값이 996.400us으로 서, 이는 측정된 전송지연이 일정한 범위에서 발생하지만, 평균의 최대 11배 정도로 큰 전송지연이 스파이크성으로 발생됨을 알 수 있다. 이러한 환경에서 II장에서 설명한 IEEE 1588의 오프셋과 전송지연의 계산식을 단순히 적용하였을 경우에는 그림 7과 같이 마스터와 슬레이브 간의 오프셋이 어느 일정한 범위에서 변동하게는 할 수 있으나, 여전히 스파이크성 전송지연이 발생하며, 이는 표 4에서도 평균 = 581 ns, 표준편차= 28.222 ns, Peak to Peak = 518136 ns의 값으로도 확인할 수 있다. 결국, 이런 결과는 네트워크 전송지연이 시간에 따라 변화가 크기 때문에 나타나며, 실제 환경에서 IEEE 1588을 사용하여 정확한 타이밍 정보를 획득하기 위해서는 사용된 네트워크 환경에 맞는 알고리즘 및 필터(filter)가 필요함을 나타내고 있다. . 또한, 필터는 측정된 네트워트 전송지연의 2가지 특징인 가우시안 분포와 스파이크성 지연변동을 반영할 수 있도록 설계될 필요가 있음을 알 수 있다.

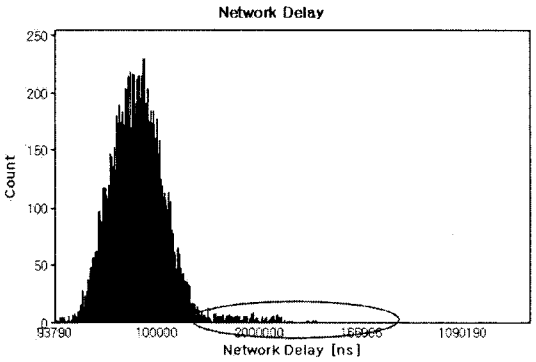

그림 6. Bar Chart of network delay

표 3. Network Delay 측정

	Values
Mean	96.281 us
StDev	24.098 us
Variance	580691.785 us
최소	93.790 us
최대	1090.190 us
Peak To Peak	996.400 us

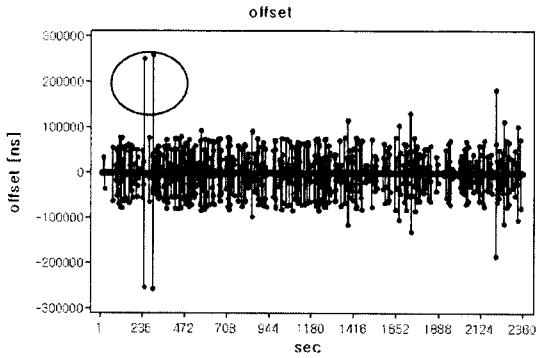

그림 7 오프셋

표 4. 오프셋 측정

	Values
Mean	581 ns
StDev	28222 ns
Variance	796460736 ns
최소	-257131 ns
최대	261005 ns
Peak To Peak	518136 ns

IV. 알고리즘제안

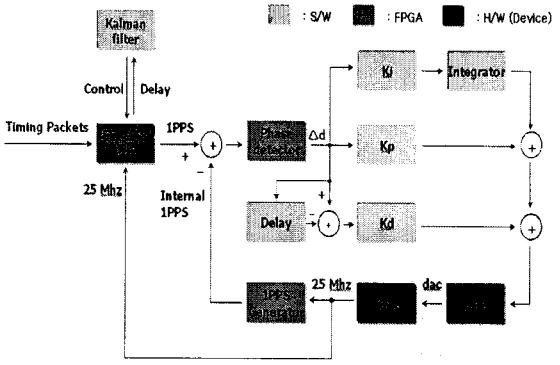

그림 8. 제안된 PLL Block diagram

본 논문에서 제안하고자 하는 알고리즘은 III장에서 설명된 네트워크 전송지연의 두 가지 특징을 반영할 수 있도록 설계되었다.

1. 가우시안 분포 (Gaussian Distribution)

IEEE 1588 마스터와 슬레이브 간의 전송지연은 평균을 중심으로 일정한 범위 내에 분포한다.

2. 스파이크성 전송지연 (Spike Network Delay)

IEEE 1588 마스터와 슬레이브 간의 전송지연은 네트워크 구성의 변화, 지터, 큐잉지연에 의해 평균에 비해 아주 큰 값이 되기도 한다.

이러한 네트워크 전송지연의 특징을 효과적으로 처리하여 정확한 타이밍 동기를 맞추기 위해서 본 논문에서는 그림 8에 나와있는 PLL (Phase Lock Loop) 알고리즘을 제안하며, 알고리즘의 구성은 다음과 같다.

1. Pre-Filter

Pre-Filter는Spike성으로 발생하는 전송지연의 효과를 감쇄시키기 위하여 사용되었으며, 네트워크의 특성에 따라 일정한 범위 이상의 전송지연을 필터링을 함

2. 칼만필터 (Kalman Filter)

MSE (Mean Square Estimation Error)를 최소화 하도록 설계되었으며, 재귀적 (recursive) 자료 처리를 함으로써 실시간으로 처리가능 함.Time Update [다음 상태를 예측 (Predict)]과정과 Measurement Update [측정 값과 추정 값을 사용하여 현재 상태를 보정] 과정을 반복함으로써 최적의 네트워크 전송지연을 실시간으로 추정함. (그림 9)

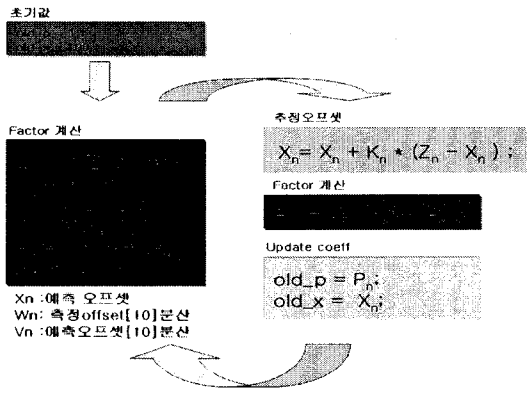

그림 9. 칼만필터 알고리즘

3. DP-PLL (Digital Processing Phase Lock Loop)

칼만필터로 부터 추정된 전송지연 값을 이용하여 내부 TCXO (Temperature-Compensated crystal Oscillator)의 출력을 제어함으로써 슬레이브의 클럭이 마스터의 클럭에 동기가 되도록 함

마스터로부터 전송된 타이밍 패킷은 네트워크 전송지연에 의하여 슬레이브에서 측정했을 때 수신시간의 변화가 심하게 나타난다. 따라서 이러한 노이즈 (Noise)가 있는 측정 데이터에서 노이즈 성분을 제거하는 역할을 Pre-filter와 칼만필터 (Kalman Filter)가 수행하며, 노이즈가 최소화된 타이밍 정보를 DP-PLL을 이용하여 슬레이브 클럭이 마스터 클럭에 동기가 되도록 조정한다.

V. 알고리즘 구현 및 측정

네트워크에서 발생하는 전송지연을 실제환경에서 발생하는 전송지연과 유사하게 그림 10 과 같이 시험환경을 구성하여 본 논문에서 제안하고자 하는 알고리즘을 적용후 마스터 GPS 1PPS와 타이밍 패킷에 의해 동기되어진 내부 1PPS의 위상(Phase)과 주파수를 측정하였다.

1. 네트워크 구성

IEEE 1588 마스터와 슬레이브 사이에 그림 4와 같이 스위치 (L2 Switch) 4대와 라우터 (Router) 1대의 연결을 구성

2. 랜덤패킷 발생

IEEE 1588 마스터와 슬레이브 사이의 패스 (Path)에 랜

덤한 패킷에 의한 부하를 발생시킬 수 있는 각종 기기 및 PC를 연결

3. 페이즈 측정 방법

제안된 알고리즘에 의해서 마스터에 동기되어진 내부 1PPS와 GPS 1PPS의 위상(Phase) 차이를 주파수 카운터(Frequency Counter)를 사용하여 측정

4. 오프셋 계산 방법.

Sync 메시지와 Follow-Up 메시지 송신시간 차와 단방향 전송지연값의 차이값를 칼만필터에 들어가는 측정 오프셋으로 사용하였으며, 단방향 전송지연값은 Delay Request 메세지 및 Delay Response 메세지를 이용하여 계산된 10개의 평균값을 단방향 전송지연 값으로 사용함

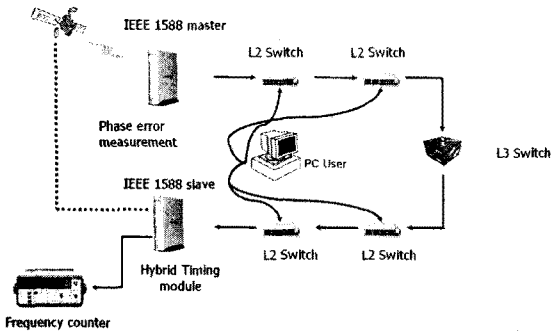

그림 10. 위상 측정 환경

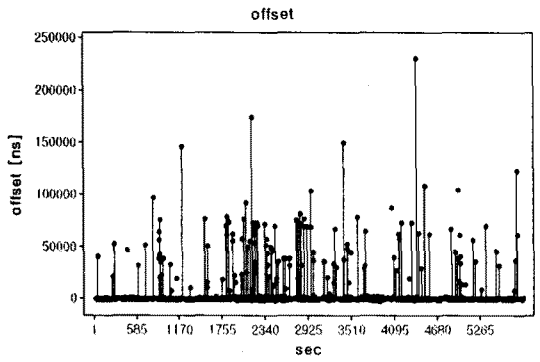

그림 11. 측정 오프셋

표 6. 측정된 오프셋 측정

	Values
Mean	1.381 us
StDev	9.770 us
Variance	95450.574 us
최소	-2.364 us
최대	230.314 us
Peak To Peak	232.678 us

5. 추정 오프셋 계산 방법

계산된 오프셋을 칼만필터의 입력값으로 사용하여 추정값을 계산함

6. 주파수 측정 방법.

제안된 알고리즘을 통한 TCXO 의 주파수를 주파수 카운터를 사용하여 측정

트래픽에 의한 지연이나 스위치 및 라우터 의 큐잉지연에 의한 변동을 줄이기 위하여 타이밍 패킷에 우선순위를 높여 주면 된다고 알고 있으나 본 실험에서는 우선순위를 높이지 않고 실험하였다. 본 실험에서는 제안된 DP-PLL 알고리즘을 적용 하였을때에 이동통신 시스템에서 요구하는 위상정확도와 주파수 정확도를 만족하는지를 보기 위하여 제안된 알고리즘에 의한 내부 1PPS와 마스터 GPS 1PPS의 위상 차이를 주파수 카운터를 사용하여 측정하여 제안된 알고리즘이 초소형 기지국 타이밍 요소기술로써 사용가능한지에 대한 성능을 평가하고자 하였다. 또한, 위상차 뿐만 아니라 제안된 DP-PLL에 의해서 제어된 TCXO 의 출력을 측정함으로써 주파수측면에서의 알고리즘의 성능을 평가하고자 하였다. 필터를 통과하기전 측정 오프셋은 그림 11 과 같이 스파이크 지연변동이 큼을 볼수가 있다. 측정된 오프셋의 특징을 통계적으로 분석하기 위하여 평균, 표준편차, Peak To Peak 값으로 표 6에 나타내었으며, 제안된 알고리즘 수행 전 측정 오프셋은 평균 = 1.381us, 표준편차 = 9.770 us 이며 Peak to Peak 값이 232.678 us 정도로 네트워트 전송지연이 발생하고 있음을 말해주다.. 그림 12는 스파이크성 지연변동이 심한 측정 오프셋을 설계된 필터를 통과한후에 계산되어진 추정오프셋으로 평균 = -0.06174 ns, 표준편차 = 142.7 ns 이며 Peak to Peak 값이 2.296 us으로 제안된 알고리즘 통과후 스파이크 지연변동이 사라지고 아주 안정적인 모습을 보여준다.

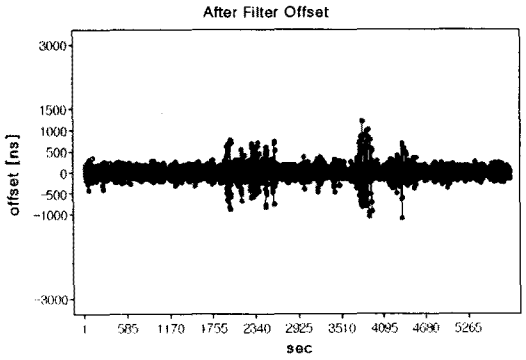

그림 12. 추정 오프셋

표 7. 추정 오프셋 측정

	Values
Mean	-0.06174 ns
StDev	142.7 ns
Variance	20.373 us
최소	-1.089 us
최대	1.207 us
Peak To Peak	2.296 us

제안된 알고리즘 수행 전 추정 오프셋과[표 6]과 수행 후 측정 오프셋[표 7]의 변화를 Peak To Peak 관점에서 보면은 232.678us 에서 2.296us 로 변동폭이 1013 배나 감소하였으며, 표준편차도 9770us 에서 142.7ns로 확연히 편차가 감소하였다. 이 결과로 볼때에 측정오프셋이 필터를 통과하면서 효율적으로 제어가 되는 것을 볼수가 있다. 제안된 알고리즘을 통해제어된 위상은 표 8 과 같이 GPS 1PPS와의 차이가 최소= -0.431us 최대= 2.121 us 로 이동통신망에서 요구하는 3us 를 충족시키며 제안된 알고리즘이 효과적임을 보여준다.

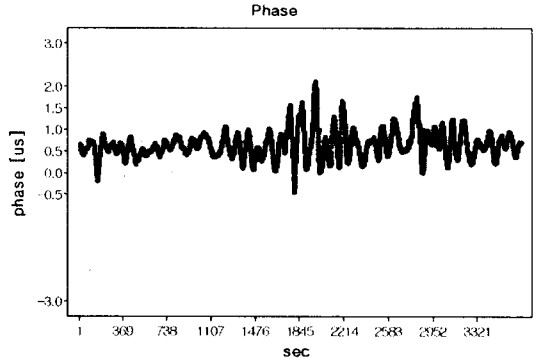

그림 13. 위상 측정

표 8. 위상 측정

	Value
Mean	0.6594 us
StDev	0.3248 us
Variance	0.105 us
최소	-0.431 us
최대	2.121 us
Peak To Peak	2.525 us

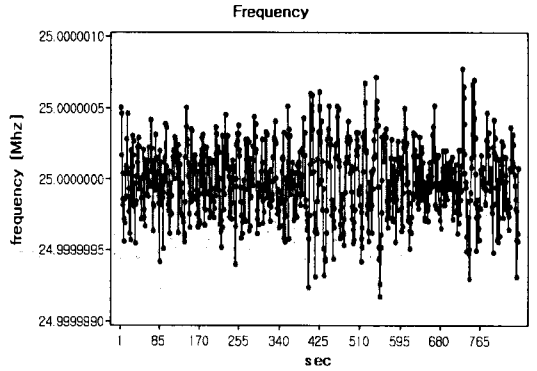

그림 14. 주파수

표 9. 주파수 측정

	Values
Mean	24999999.987Hz
StDev	0.254 Hz
Variance	0.0644 Hz
최소	25000000.778 Hz
최대	24999999.172 Hz
Peak To Peak	1.606 Hz

제안된 알고리즘을 통해 제어된 주파수는 표 9와 같이 평균값= 24999999.987Hz과 표준편차= 0.254Hzd이며 최대, 최소 변동폭이1.6Hz로 슬레이브의 주파수가 마스터의 주파수에 동기가 되어 있어 있으며 측정된 주파수는 그림 15와 같이 정규분포 함을 알 수 있다..

VII. 결 론

펨토셀에 대한 관심이 커갈수록 타이밍 동기방안에 대한 관심과 문제점을 해결하기 위한 고민은 더욱더 깊어질 것으로 보인다. 네트워크의 전송지연에 의한 측정 오프셋을

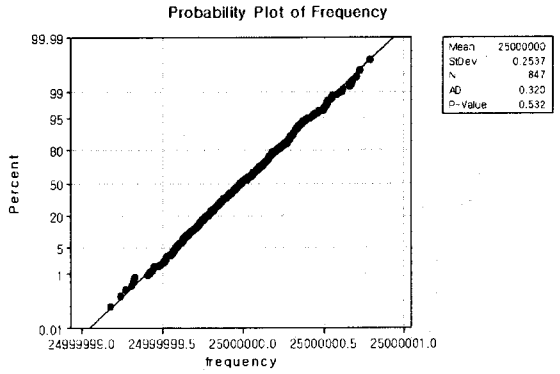

그림 15. Normality Test of Frequency

효과적으로 제어할 수 있다면 향후 펨토셀의 타이밍 동기 방안으로써의 IEEE 1588 은 아주 매력적인 요소기술로 인정 받을 수 있을 것이라 판단된다. 제안된 알고리즘을 적용한 후의 인터라넷에서의 위상과 주파수에 대한 측정결과는 이동통신기술에서 사용할 수 있다라고 할 수 있다. 하지만, 본 논문에서는 특정망을 측정하고 알고리즘을 적용 시험하였다는 한계를 지니고 있어서 모든 망에서 동일한 결과를 얻는다고 말하기 힘들다. 따라서, 더 많은 다른 상황의 네트워크에서의 실험과 분석을 통해 알고리즘을 더욱 발전시키는 것이 앞으로의 중요한 연구 과제가 될 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] IEEE P1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, July, 2008

[2] Timing and synchronization aspects in packet networks, G.8261/Y.1361, May, 2006

[3] The study on effective operation of ToP(Timing over Packet), Aug, 2007

[4] Using IEEE-1588TM Hardware as a PDV Measurement Tool, *Conference on IEEE 1588*, Oct, 2006

[5] IEEE 1588 Tutorial, *Conference on IEEE 1588*, Oct, 2006