

# 위성 멀티미디어 시스템을 위한 랜덤 지연지터에 강인한 기준 클럭 복원

## A Robust Recovery Method of Reference Clock against Random Delay Jitter for Satellite Multimedia System

김 원 호\*

Won-Ho Kim\*

### 요 약

본 논문은 DVB-RCS 규격과 페루프 버스트 동기 제어 방식을 적용한 양방향 위성 멀티미디어 시스템의 망동기 기준클럭 복원을 위한 정밀한 복원방식을 제안한다. 이러한 시스템의 단말은 TDMA 리턴링크 통신을 위한 기준클럭을 MPEG-2 규격에 정의된 PCR (Program Clock Reference)을 중심국에서 방송하고 단말은 이를 복원하여 사용한다. PCR은 중심국에서 시스템 클럭 ( $27\text{MHz} \pm 30\text{ppm}$ )을 주기적으로 샘플링 하여 각 단말로 방송하는데 단말에서 수신되는 PCR값은 위성을 포함한 전송경로에서 발생하는 가변적인 전달 지연시간 변동으로 인한 오차 때문에 일반적인 디지털 PLL(DPLL) 방식에 의해서는 복원된 기준클럭의 주파수와 중심국의 기준클럭 주파수간의 동기를 주어진 범위 이내로 정확하게 유지하기가 힘들다. 본 논문에서는 수신되는 PCR 패킷의 랜덤한 전달지연시간 변동으로 인해 발생하는 기준클럭의 복원오차를 줄일 수 있는 방식을 제시하고 시뮬레이션을 통하여 성능을 평가하였다. 제안한 방식은 일반적인 DPLL방식에 비해 기준클럭의 복원오차가 1/5로 현저하게 감소되는 성능을 보여 주었다.

### Abstract

This paper presents an accurate recovery method of the reference clock which is needed for network synchronization in two-way satellite multimedia systems compliant with DVB-RCS specification and which use closed loop method for burst synchronization. In these systems, the remote station transmits TDMA burst via return link. For burst synchronization, it obtains reference clock from program clock reference (PCR) defined by MPEG-2 system specification. The PCR is generated periodically at the hub system by sampling system clock which runs at  $27\text{MHz} \pm 30\text{ppm}$ . Since the reference clock is recovered by means of digital PLL(DPLL) using imprecise PCR values due to variable random jitter, the recovered clock frequency of remote station doesn't exactly match reference clock of hub station. We propose a robust recovery method of reference clock against random delay jitter. The simulation results show that the recovery error is remarkably decreased from 5 clocks to 1 clock of  $27\text{MHz}$  relative to the general DPLL recovery method.

**Key words** : Satellite multimedia system, PCR recovery, DVB-RCS, PLL, Clock reference

### I. 서 론

위성을 이용한 통신/방송 시스템은 광대역과 동보성을 가지는 단방향 또는 양방향 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있는 요소기술로서 인식되고 있다. 기존의 위성통신 시스템은 두 지점의 지구국간 음성 및 데이터 통신에 주로

사용되어 왔으나 최근에는 대량의 데이터를 동시에 지역적으로 넓게 퍼진 단말 사용자들에게 방송하는 서비스들이 활발히 개발되고 있으며 양방향 멀티미디어 서비스를 위한 시스템으로 확장되고 있다. 양방향 위성 멀티미디어 서비스를 위한 시스템의 국제표준으로는 유럽의 DVB-RCS 규격이 있다. 이 표준규격은 기존에 권고되어 서비스 중인 DVB-S 규격을 기반으로 하고 있으며 순방향 링크는 IP패킷을 MPEG2-TS 패킷에 실어 시분할 다중화 방식을 이용하여 광대역으로 데이터를 방송하고 리턴링크는 MF-TDMA 기법을 이용하여 각 단말은 중심국

\*공주대학교 전기전자공학부

접수 일자 : 2005. 3. 7      수정 완료 : 2005. 4. 15

논문 번호 : 2005-1-7

한다. 하나는 개루프 제어방식과 폐루프 제어방식이 있다. 개루프 제어방식은 중심국에서 방송하는 기준버스트의 수신타이밍과 각 단말에서 미리 계산된 예상지연시간을 고려하여 버스트 송신타이밍을 제어하는 방식이다. 이 방식에서 발생하는 버스트 동기 오차는 중심국과 단말의 기준 클럭 주파수 차이에 의존하지 않고 단말과 중심국간의 지리적인 거리에 의존하여 오차가 발생한다. 폐루프 방식은 중심국에서 방송하는 기준버스트 수신 타이밍과 중심국에서 측정된 수신 버스트 오차를 피드백방식으로 전달받아 버스트 송신 타이밍을 보다 정밀하게 제어하는 방식이다. 이 방식에서 발생하는 버스트 동기 오차는 지리적인 거리차가 아니라 중심국과 단말의 기준클럭 주파수차이와 위성의 이동에 의한 도플러 천이 량에 의존한다. 일반적으로 폐루프 방식에 의한 버스트 동기오차가 작아 위성 TDMA 방식에서는 폐루프 방식의 버스트 동기방식을 주로 사용한다. 따라서 폐루프 방식의 버스트 동기방식을 적용한 양방향 위성 멀티미디어 시스템에서 위성전송 경로상의 위성 움직임 등과 같은 가변 지연요소로 인하여 단말에서의 PCR 패킷의 수신타이밍이 가변 하는 조건에서 단말의 기준클럭 복원 성능은 매우 중요하다[4]-[8]. 그림 1은 폐루프 방식을 적용하여 버스트 동기를 제어하는 양방향 위성 멀티미디어 시스템의 구성도를 보여준다.

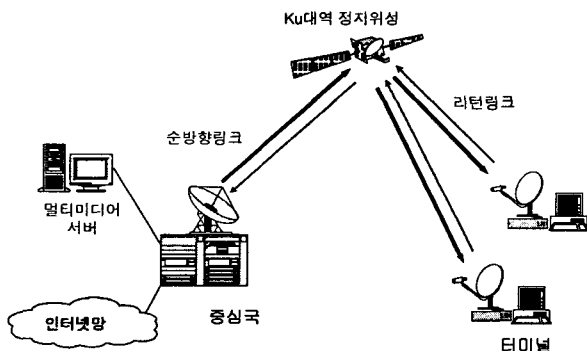


그림 1. 양방향 위성 멀티미디어 시스템의 구성도  
Fig. 1. Architecture of two-way satellite multimedia system.

그림 1과 같은 양방향 위성 멀티미디어 시스템에서 기준클럭 복원을 위하여 MPEG-2 시스템규격에서 정의하는 42비트 PCR (Program Clock Reference)을 중심국에서 주기적으로 방송하고 단말에서는 이를 수신하여 27MHz 기준클럭을 복원하여 사용한다. 중심국에서 방송하는 PCR은 주파수가 27MHz±30ppm 규격을 가지는 클럭에 의해 구동되는 42비트 카운터 값을 주기적으로 샘플링 하여 순방향 링크에 시분할 다중화 하여 방송하고 각 단말에서는 가변적으로 변하는 위성경로지연에 의해 지연된 42비트 PCR 값을 추출하여 디지털 PLL회로에 의해 27MHz 기준클럭을 복원한다. 가변 하는 PCR 패킷의 지연지터양의 변동이 커질수록 복원되는 기준클럭 주파수와 중심국의 기준클럭 주파수간의 차이는 커진다. 본 논문에서는 이러한 가변 지연지터의 변동이 큰 조건하에서도 중심국과 단말의 기준

클럭 간에 엄격한 동기를 확립하기 위해 랜덤한 지연지터에 강인한 복원 방식을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 복원성능을 기존의 방식과 비교한다.

## II. 기존 복원방식과 지연지터

기존의 PCR 기반의 기준클럭 복원은 일반적인 하나의 디지털 PLL (DPLL)로 구성되며 그림 2와 같은 기능 블록으로 이루어진다[9].

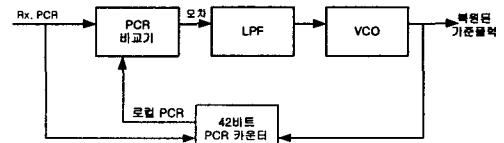


그림 2. 일반적인 PCR 기반의 기준클럭 복원회로  
Fig. 2. General PCR based recovery circuit of reference clock.

복원회로를 구성하는 각 기능블럭들의 기능은 다음과 같다. PCR 비교기는 수신되는 42비트 PCR과 단말에서 생성한 42비트 PCR값의 차이를 측정하여 얻어진 오차 값을 LPF로 인가한다. 만약, 이 오차 값이 영의 값이면 이상적으로 단말과 중심국의 기준클럭 주파수가 완전히 동기가 이루어졌다고 할 수 있다. 이 오차 값은 실제적으로 단말과 중심국의 기준클럭 발생기의 주파수 차이일 수도 있고 위성 전송 경로 상에서 발생하는 가변 하는 지연지터에 의해 발생되어진다. 디지털 저주파 통과 필터 (LPF)는 PCR 오차 값에 포함된 고주파 성분의 잡음을 제거하는 기능을 제공하며 VCO(Voltage Controlled Oscillator)는 인가되는 필터링된 오차 값이 전압 양으로 변환 인가 되면 출력 주파수가 조절되어 출력된다. 42비트 카운터는 복원된 27MHz 기준클럭을 이용하여 MPEG-2에서 정의된 로컬 PCR값을 생성하여, 비교기에서 수신된 PCR값과 비교하여 PCR 오차 값을 추출하는 데 사용된다. 가변 하는 PCR 패킷 지연지터양은 PCR 오차 값에 직접적으로 영향을 주며, 가변적인 랜덤지터에 의해 복원되는 기준클럭의 주파수는 중심국 기준클럭의 실제 주파수 값을 정확하게 트래킹할 수 없도록 만들어준다.

PCR 패킷의 오차를 유발하는 요인인 지연지터를 분석해보면 고정된 PCR패킷 지연시간과 가변 하는 지터의 두 가지 요소로 구분될 수 있다. 고정된 PCR패킷 지연시간 요소는 중심국과 단말간의 지리적 거리에 의해 발생하는 고정된 전파지연시간으로 정의되며 가변 하는 지터는 고정된 전파지연시간의 변동시간으로 정의될 수 있다. 양방향 위성 멀티미디어 시스템에서 이러한 지터의 요인은 여러 가지가 있을 수 있으며 다음과 같은 요인들로 분석할 수 있다. 요인들로는 단말과 중심국의 클럭발생기 주파수 차이로 인한 오차, MPEG 스트림 재다중화시 발생하는 PCR 수정으로 인한 오차, 중심국의 PCR 삽입 및 시분할

다중화와 단말의 추출처리과정에서 발생하는 오차, 위성파 단말의 움직임에 의해 발생하는 오차로 설명할 수 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 위하여 이러한 가변지터 크기는 랜덤 값으로 모델링하여 적용한다.

### III. 랜덤 지연지터에 강인한 복원방식

기존 DPLL 방식에 비해 가변 하는 랜덤 지연지터에 강인한 성능을 가지는 복원회로는 그림 3과 같다.

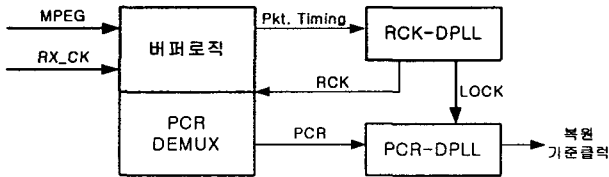


그림 3. 랜덤 지연지터에 강인한 복원회로

Fig. 3. Robust recovery circuit against random delay jitter.

제안한 복원방식은 두 개의 디지털 PLL 기반으로 구성된다. 하나는 단말의 수신 데이터 클럭을 복원하는 RCK-DPLL이고 또 하나는 동기된 수신 데이터 클럭에 의해 PCR을 추출하고 추출된 PCR을 이용하여 기준클럭을 복원하는 PCR-DPLL로 이루어진다. 기준클럭을 복원하는 동작을 단계별로 설명하면 다음과 같다. 첫 번째로 랜덤 가변지터를 억압하는 버퍼와 RCK-DPLL을 이용해 중심국의 송신 데이터 클럭과 단말의 수신 데이터 클럭 간의 동기를 맞추고, 두 번째 단계로 랜덤 가변지터가 억압된 상태에서 RCK-DPLL의 출력클럭을 이용하여 지연된 MPEG 스트림으로부터 PCR값을 추출하여 PCR-DPLL에 의해 27MHz 기준클럭을 복원한다. 여기에서 RCK-DPLL의 주역할은 가변 하는 랜덤 지연지터 조건하에서도 일차적으로 중심국의 송신 데이터 클럭을 정확하게 트래킹 하는 것이다. 이를 위해 가변 하는 랜덤 지연지터를 작은 범위이내로 억압하기 위해 버퍼를 사용하였다. DVB-S 수신기로 부터 출력되는 MPEG-TS 패킷을 버퍼링함으로써 가변 하는 랜덤 지연지터는 좁은 범위로 축소되어 기준클럭 복원시 좁혀진 지연지터 상태에서 보다 정밀하게 기준클럭을 복원할 수 있게 된다. 이를 위한 RCK-DPLL 회로의 구성도는 그림 4와 같다.

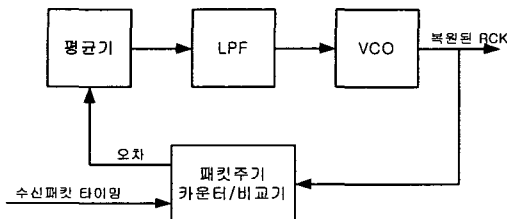


그림 4. RCK-DPLL회로의 구성도

Fig. 4. Architecture of RCK-DPLL circuit.

패킷주기 카운터/비교기는 수신되는 MPEG2-TS 패킷 타이밍을 이용해 수신되는 MPEG2-TS 패킷 주기와 고정

된 패킷주기 값과 비교하여 수신패킷 주기시간의 오차 값을 계산하여 오차 평균기로 출력한다. 오차 평균기는 입력되는 오차 값을 N회 평균하여 루프필터로 출력한다. 오차를 평균함으로써 오차의 변화단계를 줄여주면서 오차 값의 진폭도 줄여줄 수 있다. 반면에 루프의 응답속도가 느려져 풀인 과도현상이 증가하는 현상이 발생한다. 디지털 루프 필터는 평균된 오차의 고주파 잡음을 제거하도록 저역통과 필터링한다. 필터의 구성은 그림 5와 같으며 적분기를 가지는 2차 IIR 필터를 적용한다.

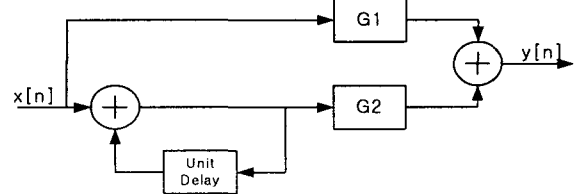


그림 5. 디지털 루프 필터의 구조

Fig. 5. Architecture of digital loop filter.

성능분석을 위해 결정된 계수 값은  $G1=0.1$ ,  $G2=0.09$ 이다. 이 값은 필터의 응답특성을 안정되게 하기 위하여 필터의 극점을 단위원 안에 위치하도록 만들기 위해 필터의 특성식을 극점이 단위원내에 위치하도록 수정하여 결정한 값이다. 이 값은 PLL의 고유특성에는 영향을 주지 않지만 풀인 과도현상, 오버슈트 길이를 변화시킨다. 그림 3에서 PCR-DEMUX는 지연된 MPEG 스트림으로부터 PCR 패킷을 처리하여 42비트 PCR값을 추출하여 PCR-DPLL로 전달한다. PCR-DPLL의 동작은 RCK-DPLL이 Lock이 된 시점부터 기준클럭을 트래킹 하도록 구성한다. PCR-DPLL 루프의 구성과 기능은 그림2와 동일하다.

### IV. 시뮬레이션 및 결과

복원성능을 비교하기 위하여 기존방식과 제안한 방식을 동일 조건하에서 시뮬레이션 하였으며 시뮬레이션을 위한 전제사항은 다음과 같다. 수신되는 PCR 패킷의 최대 지연지터양은  $\pm 1\mu s$ 로 가정하였고 수신 PCR 패킷 주기는 100ms로 가정하였다. 이 주기는 MPEG-2 시스템 규격에서 정의하는 PCR 패킷의 최소 속도이다[9]. 순방향 링크의 송신 데이터 속도는 1Mbps로 가정하였고 188바이트의 패킷 길이를 가지며 환산한 MPEG2-TS 패킷의 시간길이는 1.504ms이다. 시뮬레이션을 위한 지터모델은 전술한 대로 랜덤 값을 발생하여 수신 MPEG2-TS 패킷 주기값 또는 수신 PCR값에 더해주어 랜덤지터를 인가하였다. RCK-DPLL의 오차 평균기의 평균횟수는 실험에 의해 2회로 설정하였다. 3회 이상이 되면 복원오차가 오히려 증가하는 현상이 발생하였다. 그 이유는 비교기의 출력값, 즉 패킷 주기 오차 값이 오차 평균기의 출력값에 즉시 반영되지 않아 DPLL이 Lock상태를 잃어버리게 되는 현상 때문이다.

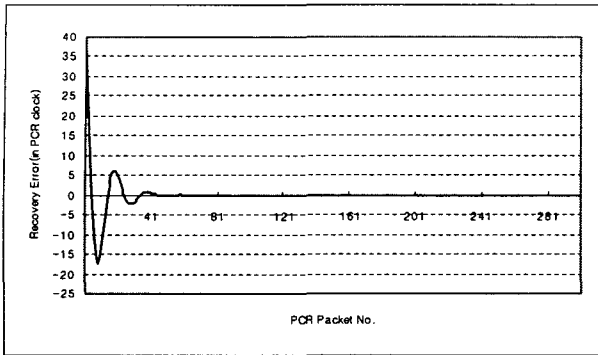


그림 6. 지연지터가 없는 경우의 기준클럭 복원 성능  
Fig. 6. Recovery performance of reference clock with no jitter.

그림 6은 지연지터가 존재하지 않는 이상적인 경우의 기준클럭 복원성능이다. 그래프의 X-축은 수신된 PCR패킷 수이고 Y-축은 복원오차를 27MHz 기준클럭 단위로 표시한 값이다. 이러한 응답은 중심국과 단말의 기준클럭이 완전히 동기화 되었을 때 보여주는 특성이다. 다시 말해 DPLL이 중심국의 기준클럭을 오차 없이 정확하게 트래킹하고 있음을 나타낸다. 그림 7은 기존방식을 이용하여  $\pm 1\mu s$  랜덤지터 조건하에서 시뮬레이션 한 결과이다. 복원된 기준클럭의 최대오차는 기준클럭(27MHz)의  $\pm 5$ 클럭이다. 이 값은  $\pm 185ns$  시간오차에 해당되며 가변 하는 지연지터양이 커질수록 기준클럭 복원오차도 비례하여 증가된다.

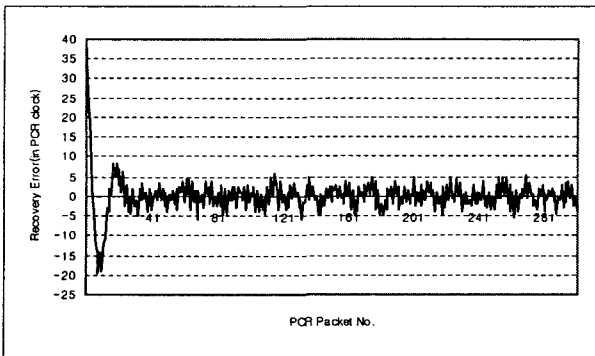


그림 7. 기존방식의  $\pm 1\mu s$  가변지터 조건에서 기준클럭 복원 성능  
Fig. 7. Recovery performance of reference clock with  $\pm 1\mu s$  of random delay jitter by using conventional method.

제안한 방식에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 8, 그림 9, 그림 10과 같다. 첫 단계로 중심국의 송신 데이터 클럭에 대한 복원 성능을 분석하고 최종적인 27MHz 기준클럭 복원성능을 분석하였다. 그림 8과 그림 9는 0.1s 주기의 PCR 패킷 당 지연지터의 가변 양이  $\pm 1\mu s$ 인 경우에 등가적으로 환산된 수신 데이터 클럭의 주파수 변화량이

$\pm 10ppm$ 일 때의 RCK-DPLL의 RCK 복원 성능이다.  $\pm 10ppm$ 의 주파수 변화량은 1Mbps 데이터 속도일 때 1.504ms 주기의 MPEG2-TS 패킷 당 약  $\pm 15ns$  지터 크기로 환산된다. 그림 8과 그림9의 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이 제안한 방식에 의해 복원된 수신 데이터 클럭의 주파수 오차는  $\pm 2ppm$ 이내로 제한되었다. 이 결과는 가변 하는 랜덤 지연지터의 양이 버퍼와 RCK-DPLL에 의해  $\pm 10ppm$ 에서  $\pm 2ppm$ 으로 억압되었음을 보여준다. 그림 8은 오차를 평균하지 않은 경우이며 그림 9는 오차를 2회 평균하여 처리한 결과이다. 오차를 평균하게 됨으로써 DPLL 루프의 응답속도는 다소 느려지나 평균하지 않은 경우와 비교하여 오차 변화 단계를 감소시키는 효과를 얻을 수 있다.

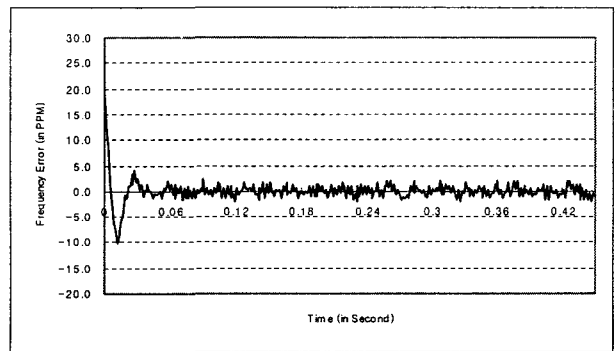


그림 8. 제안 방식의  $\pm 10ppm$ 의 주파수 오차가 발생할 때 RCK-DPLL 복원 성능 (오차평균횟수=0)  
Fig. 8. Recovery performance of RCK with  $\pm 10ppm$  of frequency change by using proposed method.(error average size=0)

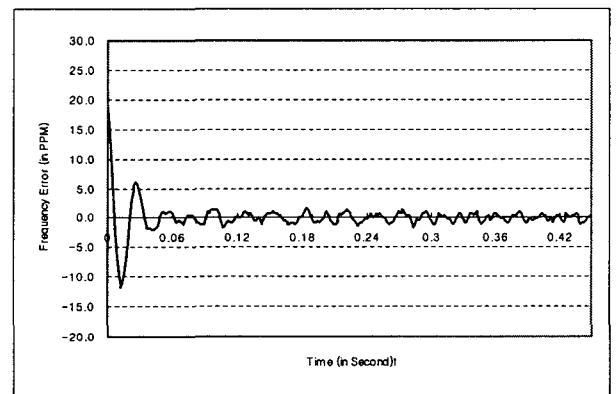


그림 9. 제안 방식의  $\pm 10ppm$ 의 주파수 오차가 발생할 때 RCK-DPLL 복원 성능 (오차평균횟수=2)  
Fig. 9. Recovery performance of RCK with  $\pm 10ppm$  of frequency change by using proposed method.(error average size=2)

두 번째 단계로 억압된 가변 지연지터 조건하에서 기준클럭이 PCR-DPLL에 의해 복원되는 성능을 분석하면 다음과 같다. 랜덤 지연지터가 억압된 조건하에서 기준클럭 복원 성능은 그림 10과 같다. 최종적으로 얻어진 기준클럭

복원 오차는 27MHz 클럭의 약  $\pm 1$ 클럭 이내로 유지되는 것을 보여준다. 시뮬레이션을 위해 억압된 PCR 패킷 당 가변 하는 지연지터의 크기는 복원된 RCK의 주파수 오차로부터 환산하여 적용하였다.  $\pm 2$ ppm 크기의 주파수 변화량은 0.1s 주기의 PCR 패킷 당 약  $\pm 200$ ns 크기의 랜덤 지터로 환산된다.  $\pm 10$ ppm의 주파수 변화가 존재하는 경우에 가변 지연지터를 억압하지 않고 기준클럭을 복원하게 되면 0.1s 주기의 PCR 패킷 당 약  $\pm 1\mu$ s 랜덤지터가 기준클럭 복원회로에 직접 인가되는 경우와 같다. 결론적으로 그림 7과 그림 10에서 보여 주듯이 제한한 복원방식은 위성 전송경로상의 가변 지터요인으로 인해 발생하는  $\pm 1\mu$ s 지연지터가 존재하는 경우에 최종적인 기준클럭의 복원오차는  $\pm 5$ 클럭에서  $\pm 1$ 클럭 이내로 감소함을 보여 주었다.

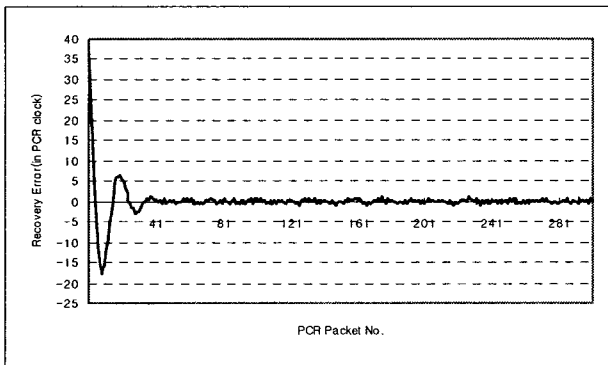


그림 10. 제안 방식의  $\pm 200$ ns로 억압된 가변지터 조건에서 최종적인 기준클럭 복원성능

Fig. 10. Final recovery performance of reference clock with  $\pm 200$ ns of suppressed delay jitter.

### V. 결론

본 논문에서는 양방향 위성 멀티미디어 시스템의 동기화를 위하여 두 개의 DPLL 기반으로 하는 랜덤 지연 지터에 강인한 기준클럭 복원방식을 제안하였다. 이 방식은 MPEG-2 시스템 규격에서 정의한 PCR을 이용하여 랜덤한 성질을 가지는 가변 지연지터를 인가하여 기존 방식과의 복원성능을 비교하였다. 제안된 방식은 위성 전달 경로 상에서 여러 가지 요인으로 발생하는 지연지터의 양이  $\pm 1\mu$ s인 조건에서 기준클럭(27MHz)의  $\pm 1$ 클럭 이내로 동기를 엄격히 제어할 수 있음을 보여주었으며, 가변 지연지터가 보다 큰 값으로 증가되더라도 기존 방식에 비해 현저하게 복원오차를 줄일 수 있음을 예상할 수 있다. 따라서 제안된 방식은 DVB-RCS 규격과 호환되는 양방향 위성 멀티미디어 시스템의 단말에 적용하여 리턴링크의 정밀한 TDMA 버스트 동기를 위한 기준클럭 복원회로로 사용이 가능하고, 더 나아가 단말의 움직임 변동이 지연지터의 큰 요인이 되는 이동형 양방향 위성 멀티미디어 시스템에도 적용이 가능할 것으로 보인다.

### 참 고 문 헌

- [1] J.Neale, R.Green, J.Landovskis, "Interactive channel for multimedia satellite networks", IEEE communications Magazine, pp.192-198, March 2001.
- [2] H.Hkinnemoen, R.Leirvik, J.Hetland, H.Fanebust, V.Paxal, "Interactive IP network via satellite DVB RCS", IEEE journal of selected areas in communications, Vol.22, No.3, pp.508-517, Apr.2004.
- [3] H.Linder, H.D.Clausen, B.c.Nocker, "satellite internet services using DVB/MPEG-2 and multicast web caching", IEEE Communication Magazine, pp.156-161, June 2000.
- [4] William W.Wu, Elements of digital satellite communication, computer science press, pp.350-363, 1991.
- [5] C.Tryfonas, A.Varma, "Timestamping schemes for MPEG-2 systems layer and their effect on receiver clock recovery", IEEE trans. on multimedia, Vol.1, No.3, Sep. 1999.
- [6] R.P.Singh, S.H.Lee, C.K.Kim, "Jitter and clock recovery for periodic traffic in broadband packet networks", IEEE trans. on communications, Vol.42, No.5, May. 1994.
- [7] H.Hassanzadegan, N. Sarshar, "A new method for clock recovery in MPEG decoder", Proceeding of OSEE 2001.
- [8] Kubota, S, Morikura, M, kato, S., "high quality frame synchronization for satellite video signal transmission", IEEE transactions on aerospace and electronic systems", V31, no.1, 1995, pp430-435
- [9] MPEG-2 system spec., ISO/IEC 13818-1, 1996.



김 원 호 (Won-Ho Kim)

1985년 경북대 전자공학과(공학사)  
 1987년 경북대 전자공학과(공학석사)  
 1999년 충남대 전자공학과(공학박사)  
 1989년 12월~1999년 8월 한국전자통신 연구원(ETRI) 무선방송기술연구소 선임 연구원

구원

1999년 9월 ~ 2005년 2월 천안공업대학 전자과 조교수  
 2005년 3월 ~ 현재 공주대학교 공과대학 전기전자공학부 조교수

관심분야 : 위성멀티미디어시스템, 영상통신, 디지털신호처리