

적응적 루프필터의 지터 변화율을 이용한 ATSC DTV 시스템의 심볼 타이밍 동기 성능 개선

*남완주 *이주형 *김재명 **김승원

*인하대학교 정보통신대학원 **한국전자통신연구원

*softlight@paran.com

Improved Symbol Timing Recovery using the jitter slope-rate of adaptive loop filter in ATSC DTV systems

*Nam, Wan-Ju *Lee, Joo-Hyung *Kim, Jae-Moung **Kim, Seung-Won

*The Graduate School of Information & Telecommunications Inha University

**Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

ATSC 지상파 DTV 시스템에서 심볼 타이밍 동기 성능 개선을 위한 알고리즘을 제안한다. 일반적으로 심볼 타이밍 동기를 위해 사용되는 가드너 방법은 다중 경로 페이딩 환경에서 성능이 좋지만 지터에 의해 성능 열화가 발생한다. 지터량은 루프 필터 대역폭이 작을수록 작아지지만, 수렴속도는 느려지게 된다. 수렴속도는 빠르면서 수렴 후 지터량을 감소시키기 위해 일정시간마다 루프필터의 출력 값을 평균하고 이 평균값을 이용하여 옵셋량을 추정한 후 추정된 옵셋의 변화율에 따라 루프 필터의 대역폭을 줄여 지터의 크기를 줄이는 알고리즘을 제안한다.

1. 서론

8-VSB(vestigial sideband) 변조기법을 사용하는 ATSC DTV 시스템은 고품질, 고음질을 위해 높은 데이터 전송률을 가지고 있다. 또한 실내의 고정 수신 뿐 아니라 점차 휴대 및 이동수신 서비스를 요구하게 되어 이를 해결하기 위한 방법 중의 하나로 수신기의 동기 연구가 활발히 이루어지고 있다.

수신기에서 심볼 타이밍 동기는 샘플링 클럭 주파수의 오차와 위상 오차로 인해 발생하는 샘플링 클럭 주파수 옵셋과 위상 옵셋을 보상하는 과정을 말한다. ATSC 규격에 소개되어 있는 심볼 타이밍 동기 방법은 77.3 μ s마다 반복적으로 +5, -5, -5, +5가 삽입된 세그먼트 동기를 이용하는 방법이다. 이는 0, +, 0, - 신호의 필터를 통과시키면 타이밍 에러 정보를 구할 수 있다^[1]. 세그먼트 동기의 에러를 줄이기 위해 수십 개의 세그먼트 동기를 평균하여 사용하는데 이러한 방식은 긴 에코에 대한 영향은 없다는 장점이 있지만 짧은 에코에 영향을 많이 받고 77.3 μ s마다 하나의 세그먼트 동기에 의해 변하는 채널을 추적하므로 실제로 빠른 동기를 유지하기 어려운 단점이 있다^[2]. 또한 주파수 동기를 위한 FPLL(Frequency Phase Locked Loop)에서 위상 옵셋이 남아있으면 심볼 타이밍 동기를 이룰 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 일반적으로 심볼 타이밍 동기에서 사용하는 가드너 방법을 기본적으로 이용한다. 가드너 방법은 매 심볼마다 타이밍 에러 성분을 추출하므로 변하는 채널에서 타이밍 동기를 추적하면서 동기를 유지하는데 유리한 방식이다. 옵셋 추정값을 누적하여 평균을 구하면 정확한 샘플링 클럭 옵셋을 구할 수 있는데 루프 필터가 옵셋의 추정값을 누적하여 평균을 구하는 역할을 한다^[3]. 그러나 가드너 방법은 8-VSB와 같은 다중 레벨 변조를 사용하는 시스템에서는 지터량이 증가하는 단점이 있다^[4] 루프 필터의 대역폭이 크면 빠른 수렴 속도를 얻을 수 있지만 추정값에 대한 지터가 심하게 발생하고 대역

폭을 줄이면 지터는 줄지만 수렴 속도가 느려지는 문제점이 있다^[5].

본 논문에서는 초기 루프 필터의 대역폭을 크게 해준 후 지터의 평균값을 이용하여 샘플링 옵셋을 추정하고 이후 추정된 샘플링 옵셋의 추정값의 변화율에 따라 단계적으로 루프 필터의 대역폭을 줄임으로써 수렴 속도를 향상 시키고 수렴 후 지터량을 줄이는 방법을 제안한다. 2장에서는 기존의 심볼 타이밍 동기를 위한 가드너 알고리즘과 문제점을 논의 하고 3장에서는 제안하는 심볼 타이밍 동기 알고리즘을 살펴보고 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 성능을 비교 분석한다. 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 기존 가드너 심볼 타이밍 동기 방식과 문제점

ATSC DTV에서는 심볼 타이밍 동기를 획득하기 위해 세그먼트 동기 방식과 가드너 방식을 일반적으로 사용한다. 세그먼트 동기 방식은 잡음이 없는 환경에서는 가드너 방식보다 성능 열화가 적지만 잡음이 있는 환경에서는 가드너 방식보다 성능 열화가 심하다^[2]. 이는 세그먼트 동기는 832심볼 마다 옵셋을 추정하는 반면에 가드너 방식은 매 심볼 옵셋을 추정하기 때문에 잡음과 다중 경로에 강인하여 심볼 타이밍 동기획득을 위해 많이 사용되고 있다. 가드너 방식은 심볼 레이트의 두 배로 샘플링 된 신호 간의 곱의 차를 이용하여 샘플링 클럭 옵셋을 추정하는 방식으로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta(t) = r(t - 1/2) \{r(t) - r(t - 1)\} \quad (1)$$

여기서 $\delta(t)$ 는 추정 샘플링 오차이고, $r(t)$ 는 두 배로 샘플링된 수신 데이터이다. 식 (1)과 같이 샘플링 클럭 옵셋을 추정하게 되면 오차가 없는 경우에도 옵셋이 발생한다. 그러나 램덤한 데이터를 계속 통과시키면서 루프 필터를 이용하여 옵셋 추정값을 누적하여 평균

을 구하면 정확한 샘플링 클럭 옵셋을 추정할 수 있다.

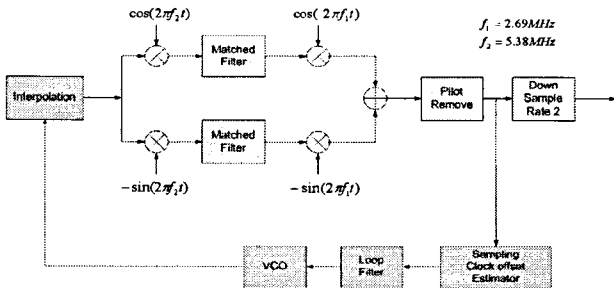


그림 1. 가드너 방법의 심볼 타이밍 동기 루프

그림 1은 ATSC DTV시스템에서 가드너 방법의 심볼 타이밍 동기 루프이다. 수신된 신호는 ADC(Analog Digital Converter)를 거쳐 정합 필터를 통과한 후 두 배로 오버 샘플링 된다. 두 배 이상 샘플링 된 신호는 파일릿을 제거 하고 샘플링 클럭 옵셋 추정기로 옵셋을 추정하고 루프 필터 통과하면서 옵셋의 평균을 취하는 역할을 수행 후 VCO를 거치고 보간 필터를 이용하여 심볼 타이밍 옵셋을 보정한다.

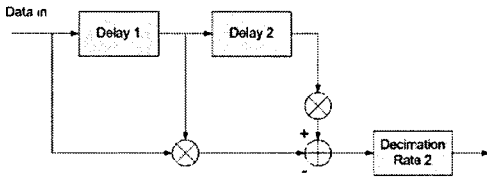


그림 2. 가드너 방법의 샘플링 옵셋 추정기

그림 2는 가드너 방식의 샘플링 클럭 옵셋 추정기이다. 두 배로 샘플링된 신호들이 들어오면 그림 2와 같이 신호간의 곱의 차를 이용하여 샘플링 클럭 옵셋을 추정한다. 추정된 값은 루프 필터와 VCO를 거쳐 심볼 타이밍 동기를 획득한다.

이러한 가드너 알고리즘은 BPSK/QPSK 신호의 경우, 두 심볼의 중간 샘플이 0에 가까운 값이 되지만 ATSC DTV시스템에서 사용하는 8-VSB변조와 같은 다중레벨 신호의 경우는 중간 샘플의 값이 다양한 값을 가지게 된다. 물론 전송하는 신호의 평균값이 0이기 때문에 누적된 중간 샘플의 평균은 0인 값을 가지지만 매 순간마다 $r(t)$ 와

$r(t-1)$ 의 중간값인 $r(t-\frac{1}{2})$ 이 0이 아닌 값을 가질 수 있기 때문에 타이밍 지터가 매우 커지는 문제점을 가지게 된다^[4].

3. 제안하는 동기 알고리즘

심볼 타이밍 동기 획득에 적합한 가드너 방식은 다중경로에 따른 성능 열화가 적고 반송파 동기와 독립적으로 빠른 수렴 시간을 갖지만 자기 신호간의 간섭인 지터에 의해 성능이 떨어진다. 따라서 지터의 크기를 줄이고 성능을 향상 시킬 수 있는 알고리즘을 제안한다.

그림 3은 루프필터 대역폭이 800ppm, 500ppm, 200ppm 일 때에 따른 수렴 곡선이다. 대역폭이 800ppm의 경우는 수렴속도는 빠르지만 지터 발생이 크고, 200ppm일 경우는 수렴 속도는 느리지만 지터 발생은 적으며 500ppm일 때는 중간 성능을 갖는다. 루프 필터의 대역폭이 크면 빠른 수렴 속도를 갖지만 큰 지터가 발생하고 작으면 이와 반대가 되는 결과를 얻을 수 있다.

루프 필터 대역폭이 큰 경우 지터의 크기가 크더라도 빠른 수렴 시간을 갖기 때문에 지터의 평균값을 구하면 초기 시간에 옵셋값에 근접

한 값을 얻을 수 있다. 하지만 빠른 수렴 시간을 이용하기 때문에 지터의 크기는 크게 되고 성능은 열화 된다. 이에 따라 성능 열화를 줄이기 위해 적절하게 대역폭을 줄여서 지터의 크기를 줄일 필요가 있다.

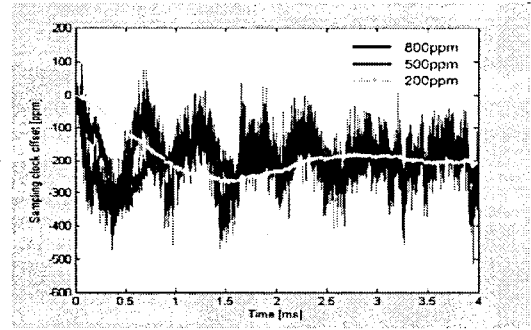


그림 3. 루프 대역폭에 따른 심볼타이밍 동기성능

본 논문에서 제안하는 동기 알고리즘은 대역폭이 클 경우 빠르게 수렴한다는 특징과 대역폭이 작을 경우 지터의 크기가 작다는 특징을 이용한 알고리즘이다. 대역폭이 클 경우 빠르게 수렴한다는 특징을 이용하여 초기에는 루프 필터 대역폭을 크게 설정하여 루프 필터를 통과한 데이터의 일정 관찰 시간동안 지터의 평균값을 구한다. 이 지터의 평균값을 이용하여 초기에 옵셋값을 추정하며 이후 지터의 크기를 줄이기 위해 점차적으로 대역폭을 줄이고 평균 지터의 크기를 다시 구한다. 이 평균값을 사용하여 옵셋값을 추정하며 다시 대역폭을 줄이는 것을 반복하는 알고리즘이다.

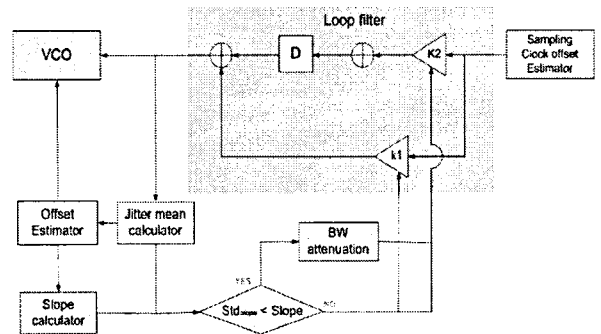


그림 4.제안한 동기 알고리즘

그림 4는 제안한 알고리즘으로 특정 관찰 시간 동안 루프 필터를 통과한 데이터의 지터 평균값을 지터 평균 계산기를 통해 구하여 옵셋을 추정한 후 대역폭 감쇄기를 통해 루프 필터의 대역폭을 줄인다. 줄어든 대역폭으로 루프 필터 계수는 바꾸고 다시 특정 관찰 시간 동안 루프 필터를 통과하면 지터의 크기는 줄어든다. 루프필터 계수는 다음 식 (2)~(7)와 같이 대역폭에 의해 결정된다.

$$B_L = \frac{w_n}{2} \left(\zeta + \frac{1}{4\zeta} \right) [Hz] \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{2\zeta w_n}{K} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{\Delta T_1 w_n^2}{K} \quad (4)$$

$$K = 2\pi K_{NCO} K_{pd} \quad (5)$$

$$\text{if } input_{slope} < std_{slope}, \quad std_{slope} = std_{slope} * k \quad (6)$$

(0 < k < 1)

$$B_L = B_{initial} \times \alpha^n \quad (7)$$

식 (2)에서 B_L 은 루프 필터 대역폭, w_n 는 루프 고유 주파수, ζ 은 댐핑 상수를 나타내며, B_L 을 결정하면 w_n 을 구할 수 있으며, 식 (3), (4)와 같이 K_1, K_2 는 2차 루프 필터의 계수가 결정된다. K 는 루프 이득, ΔT_1 은 루프 필터의 동작 시간차, K_{NCO} 와 K_{pd} 는 각각 NCO의 이득과 위상검출기의 이득을 나타낸다. 특정 관찰 시간 동안 초기 대역폭 B_L 에서의 초기 지터 평균값과 다음에 관찰된 지터평균값의 변화율이 기준보다 작으면 다음 대역폭은 감쇄 계수 α 배 만큼 감소하게 되며 기준 또한 k 만큼 작아지게 된다. $n \cdot \Delta T$ 시간 이후 대역폭은 식 (7)과 같이 된다. 감쇄 계수 α 는 채널의 특징에 따라 1보다 작은 값으로 적절히 정할 수 있으며 초기 대역폭 초기 시간 지터 평균값을 추정하기 적합한 값을 정할 수 있다.

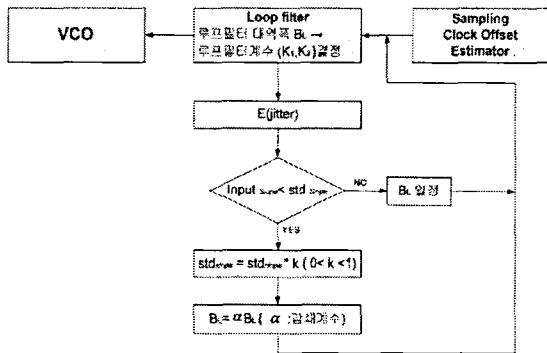


그림 5. 제안한 심볼 타이밍 동기 알고리즘 흐름도

그림 5는 제안한 알고리즘을 간단히 나타내었다. 본 논문에서 제안하는 동기 알고리즘은 기존 가드너 방법에서 빠른 수렴 후 지터의 크기가 큰 것을 줄이기 위해 제안한 방식으로 지터의 크기를 줄이는 동시에 수렴 속도도 줄여 성능을 향상 시킬 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

일반적으로 DTV에서는 Brazil 채널 모델을 사용하는데, A와 B는 실외 수신 안테나 환경, C는 실외와 실내 중간 지점, D는 실내 안테나 환경이다^[6].

표 1. 브라질 필드 테스트 채널 모델

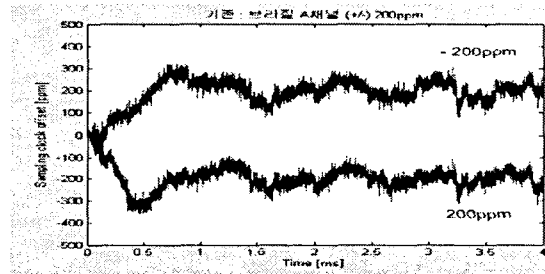
	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6	
A	Amp.	1.0	0.2045	0.1548	0.1790	0.2078	0.1509
	dB	0	-13.8	-16.2	-14.9	-13.6	-16.4
	Delay[μs]	0	0.15	2.22	3.05	5.86	5.93
B	Amp.	1.0	0.2512	0.6310	0.4467	0.1778	0.0794
	dB	0	-12.0	-4.0	-7.0	-15.0	-22.0
	Delay[μs]	0.00	0.30	3.50	4.40	9.50	12.70
C	Amp.	0.7263	1.0000	0.6457	0.9848	0.7456	0.8616
	dB	-2.8	0.0	-3.8	-0.1	-2.5	-1.3
	Delay[μs]	0.000	0.089	0.419	1.506	2.322	2.799
D	Amp.	0.2045	0.1341	0.1548	0.1789	0.2077	0.1509
	dB	-0.1	-3.8	-2.6	-1.3	0	-2.8
	Delay[μs]	0.15	0.63	2.22	3.05	5.86	5.93

표 1은 브라질 채널 모델의 특성을 나타낸 것으로 각각의 채널 특성을 보여준다.

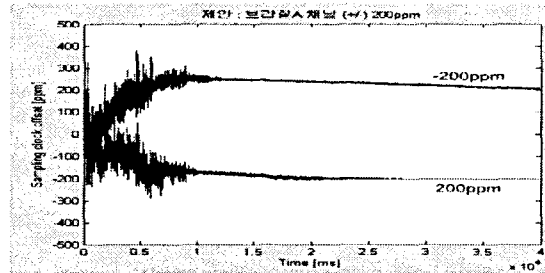
표 2. 이동수신 채널 모델

	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6	
A	Amp.	1.0	0.794	0.1258	0.1	0.032	0.01
	dB	0	-1.0	-9.0	-10.0	-15.0	-20.0
	Delay[ns]	0	310	710	1090	1730	2510

이동 수신에 대한 채널 정보는 표 2에서와 같이 ITU-R M.1225에 제시된 channel profile을 사용하였다^[7]. 그리고 이동국의 속도에 대한 도플러 효과는 Jakes' model을 이용하고 반송파 주파수는 UHF대역 채널 15번인 476MHz를 사용하여 모의 실험하였다^[8].

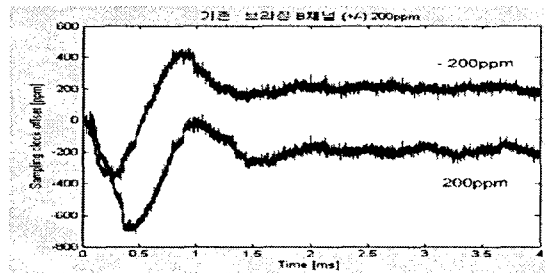


(a) Brazil A 채널에서 기존 가드너 방식

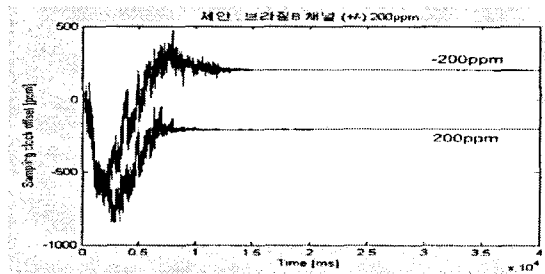


(b) Brazil A 채널에서 제안한 가드너 방식

그림 6. 브라질 A 채널에서의 VCO 입력 제어 신호

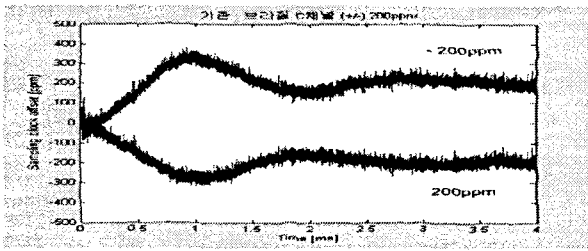


(a) Brazil B 채널에서 기존 가드너 방식

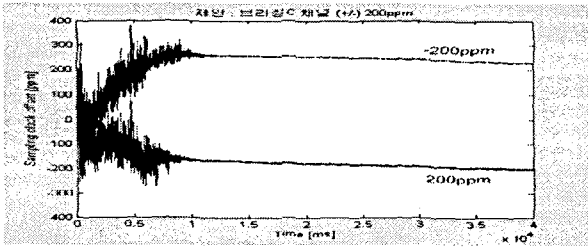


(b) Brazil B 채널에서 제안한 가드너 방식

그림 7. 브라질 B 채널에서의 VCO 입력 제어 신호

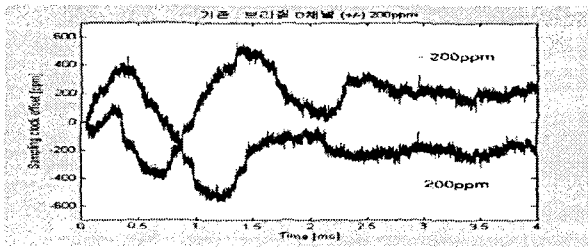


(a) Brazil C 채널에서 기존 가드너 방식

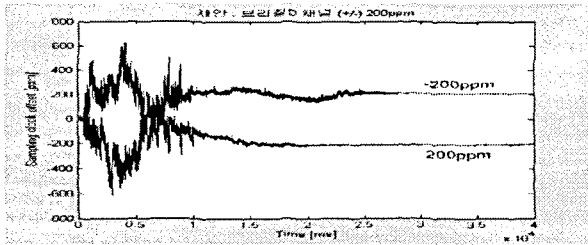


(b) Brazil C 채널에서 제안한 가드너 방식

그림 8. 브라질 C 채널에서의 VCO 입력 제어 신호

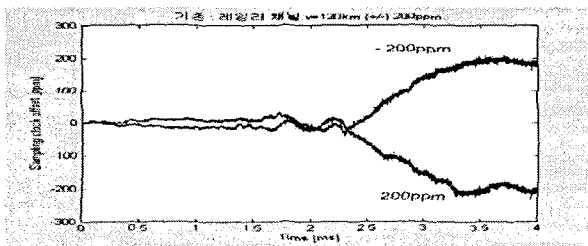


(a) Brazil D 채널에서 기존 가드너 방식

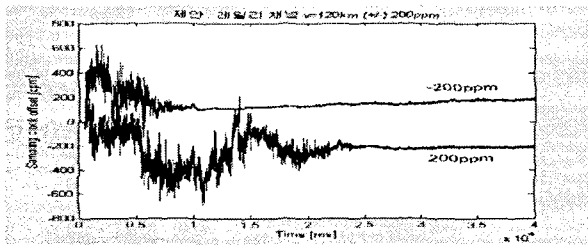


(b) Brazil D 채널에서 제안한 가드너 방식

그림 9. 브라질 D 채널에서의 VCO 입력 제어 신호



(a) Rayleigh에서 기존 가드너 방식(120km/h)



(b) Rayleigh에서 제안한 가드너 방식(120km/h)

그림 10. Rayleigh 채널에서의 VCO 입력 제어 신호(120km/h)

그림 6~10은 각 채널별로 기존 방식과 제안한 방식에 대한 지터

량과 수렴 시간을 비교한 그림이다. 기존 방식에서 대역폭은 500ppm, 제안 방식에서는 초기 대역폭은 1000ppm을 사용했으며, 초기 샘플링 클럭 오프셋 $\pm 200\text{ppm}$ 을 주었다. 오프셋 추정을 위한 관찰 시간은 대 0.1ms로 하였다. 추정된 오프셋의 변화율에 기준값의 갱신은 브라질 채널에서는 초기 기술기에 $k=0.3$ 을 곱하였고 레일리 채널에서는 $k=0.5$ 를 곱하였다. 루프필터의 갱신은 5번으로 한정하였다. 감쇄 계수는 브라질 채널에서 0.65, 레일리 채널에서 0.70을 사용하였다. 초기에 지터의 크기는 크지만 추정된 오프셋값으로 보정되는 것을 볼 수 있으며 수렴이 되어 추정 오프셋의 변화가 작아지면서 루프 필터의 대역폭이 줄어들어 지터가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 브라질 채널과 레일리 채널에서 모두 제안된 방식이 지터의 크기가 적으며 수렴속도 또한 빠른 것을 알 수 있다.

5. 결론

ATSC 지상파 DTV 시스템에서 심볼 타이밍 동기를 얻기 위해 가드너 방식을 사용한다. 가드너 방식은 다중경로 페이딩 환경에서 강한 동기 방식으로 좋은 성능을 가지지만 큰 지터의 발생으로 성능의 열화를 가져온다. 따라서 본 논문에서는 지터량을 줄이면서 성능 향상을 시킬 수 있는 심볼 타이밍 동기 방식을 제안하고 그 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통해 보였다. 제안한 알고리즘은 특정 관찰 시간 동안 루프 필터를 통과한 데이터 출력을 평균하여 그 평균값으로 오프셋량을 추정 후 오프셋의 변화율이 작아지면 수렴하고 있다고 가정하고 점차적으로 지터량을 줄이는 방식이다. 루프 대역폭이 클 경우 지터량은 크지만 빠르게 수렴하기 때문에 수렴 후 지터 평균은 추정 오프셋에 가깝게 되며 이를 통해 빠른 수렴속도를 가질 수 있다. 이후 점차적으로 루프 대역폭을 조절하여 지터의 크기를 줄임으로써 보다 좋은 심볼 타이밍 동기 성능을 가질 수 있다.

참고 문헌

- [1] ATSC A/54, Guide to the use of the ATSC digital television standard, Dec. 2003.
- [2] Yong Chul Kim, Young Ho Oh, Seong Joon Baek, Dae Jin Kim, "Timing-Offset Compensation Techniques in ATSC DTV Receivers," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol.49, no.3, pp.519-523, Aug. 2003.
- [3] Floyd M. Gardner, "A BPSK/QPSK Timing-Error Detector for Sampled Receivers," *IEEE Trans. on Communications*, COM-24, May 1986.
- [4] 진광호, 임명섭, "Multi-level PAM신호에 적용 가능한 기술기 보상 심볼타이밍 알고리즘," *한국통신학회 논문지*, vol.26, no.11A, pp.1864-1871, Nov. 2001.
- [5] Huang zhijie, Yi zhiqiang, Zhang Ming, Wang Kuang, "8PSK Demodulation for New Generation DVB-S2," *ICCCAS 2004. International Conference*, vol.2, pp.1447-1450, June 2004.
- [6] Mackenzie report, refer to the test in DTV systems, May 2000.
- [7] Rec. ITU-R M.1225, Guideline for evaluation of radio transmission technologies for ITM-2000, pp27-29, 1997.
- [8] Gordon L. Stuber, *principles of Mobile Communication*, Kluwer Academic Publishers, second edition, pp80-85, 2001.