

펄스 성형 필터를 사용하는 시스템에서 전송대역폭의 감소에 따른 비트 오류

정영모

한성대학교 정보통신공학과

ymchung@hansung.ac.kr

Bit Error Rate of Systems Using Pulse Shaping Filters with a Transmission Bandwidth Reduction

Young Mo Chung

Dept. of Information and Communications Engineering, Hansung University

요약

본 논문에서는 채널의 전송대역폭이 제한되는 환경에서 성형 펄스로 RTPZD(root trapezoidal), RBTRC(root better than raised-cosine), 그리고 RRC(root raised-cosine)를 적용한 시스템의 BER(bit error rate) 성능을 컴퓨터 모의실험을 통하여 비교 분석하였다. 실험 결과 RBTRC는 RTPZD를 적용한 시스템보다 채널의 대역폭 제한에 더욱 민감하여, 채널의 전송대역폭이 협소하여짐에 따라 RBTRC를 적용한 시스템의 BER 성능이 RTPZD의 성능보다 더 큰 폭으로 저하됨을 관찰할 수 있었다. RBTRC 펄스는 심볼 타이밍 오차에 다른 성형 펄스보다 덜 민감한 장점이 있지만, 대역제한된 채널에서는 성능 저하가 크므로 성형 펄스로 RTPZD 또는 RRC 펄스를 적용하는 것이 더 유리하다고 판단된다.

1. 서론

대역제한된 채널에서 인접한 심볼간 간섭(intersymbol interference: ISI)을 감소시킬 목적으로 펄스 성형(pulse shaping)을 한다. 성형 펄스로 RC(raised-cosine) 펄스가 널리 사용되고 있으나, 최근 새로운 성형 펄스로 BTRC(better than raised-cosine)가 제안되었다[1]. BTRC는 심볼 타이밍 오차에 대한 민감도가 RC 펄스보다 낮다고 알려져 있다[1,2]. 그리고 이들 성형 펄스 이외에, Nyquist 펄스 [3]의 일종인 TPZD(trapezoidal) 펄스[4] 역시 ISI 제거를 목적으로 하는 성형 펄스로 사용될 수 있다. TPZD 펄스는 사다리꼴의 단순한 스펙트럼 형태를 가진다.

송신 필터와 수신 필터가 서로 대응되고, 두 필터의 합성된 임펄스 응답으로 BTRC 와 TPZD 펄스가 되는 필터를 각각 RBTRC(root BTRC)[5]와 RTPZD(root TPZD) 필터라 한다. RBTRC 필터 및 RTPZD 필터는 RRC(root RC) 필터와 동일하게 백색 잡음이 있는 환경에서 ISI와 잡음에 대한 영향을 최소화하는 최적 송수신 필터이다 [3,5].

한편 RRC 필터, RBTRC 필터 및 RTPZD 필터의 임펄스 응답은 잘 알려져 있듯이 시간제한되지 않은 형태를 가진다[5]. 즉, 파형의 중심에서 주변으로 멀어지면 파형의 크기가 줄지만 이론적으로 0은 아니다. 그러므로 실제 환경에서는 어느 정도의 길이로 파형을 잘라서 사용하는데, 시간 영역에서 잘라진 펄스는 주파수 영역에서 스펙트럼의 확산을 가져온다.

본 연구에서는 채널의 전송 대역폭이 감소하게 되는 경우, 백색 가산 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise: AWGN) 환경에서 시간제한된 RTPZD와 RBTRC 필터를 송수신 필터로 사용한 시스템의 BER(bit error rate) 성능을 비교 분석한다. 그리고 AWGN 환경에서 matched 필터를 사용한 시스템의 이론적인 BER과 RRC를 송수신

필터로 적용한 시스템의 BER 결과도 비교의 목적으로 함께 제시한다.

2. 성형 펄스

전체 시스템의 블록선도를 그림 1에 제시하였다. 소스의 이진 정보 b_k 는 매 T 초 간격으로 발생하고, 발생된 정보는 인코더에서 임펄스 열에 포함된다. 임펄스 열은 송신 필터에서 펄스 성형되어 수신측으로 전송된다. 송신 신호는 대역제한된 채널을 통과하고 잡음이 더하여져 수신된다. 수신 신호는 matched 필터인 수신 필터를 통과한 다음 표본화되어 최종적으로 이진 정보로 검출된다.

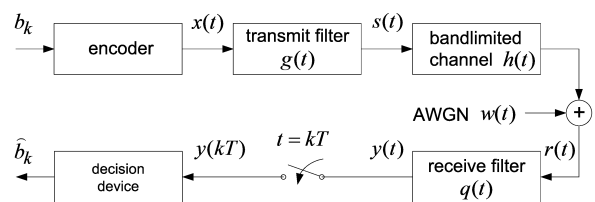


그림 1. 시스템의 블록선도

가. RTPZD 펄스

심볼 시간이 T 인 경우, ISI 없이 신호를 전송할 수 있는 최소의 전송 대역폭 $B_0 = 1/2T$ 이다[3]. 주파수 영역에서 RTPZD 펄스의 형태는 다음과 같다.

$$G_{RT}(f) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |f| < B_0(1-\alpha) \\ \sqrt{\frac{B_0(1+\alpha)-|f|}{2B_0\alpha}}, & B_0(1-\alpha) \leq |f| < B_0(1+\alpha) \\ 0, & |f| \geq B_0(1+\alpha) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 α 는 roll-off factor이다. 주파수 영역에서 RTPZD와 RBTRC의 스펙트럼을 비교하면, RTPZD가 $B_0(1+\alpha)$ 부근의 주파수에서 RBTRC보다 더 작은 스펙트럼 성분을 가진다.

나. RBTRC 펄스

주파수 영역에서 RBTRC 펄스는 다음과 같이 표현된다[1].

$$G_{RB}(f) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |f| < B_0(1-\alpha) \\ \exp\left(-\frac{\ln 2}{2B_0\alpha}(f-B_0(1-\alpha))\right), & B_0(1-\alpha) \leq |f| < B_0 \\ \sqrt{1-\exp\left(-\frac{\ln 2}{B_0\alpha}(B_0(1+\alpha)-f)\right)}, & B_0 \leq |f| < B_0(1+\alpha) \\ 0, & |f| \geq B_0(1+\alpha) \end{cases} \quad (2)$$

여기서 α 와 B_0 는 RTPZD에서 정의된 것과 동일하다. RBTRC 펄스의 스펙트럼은 BTRC의 스펙트럼 $G_B(f)$ 와 $G_{RB}(f) = G_B(f)^2$ 의 관계가 있다. RBTRC는 시간 영역에서 펄스의 가장 큰 sidelobe의 크기가 Nyquist 펄스의 sidelobe보다 크지 않아, 심볼 타이밍 오차에 덜 민감한 특징이 있다고 알려져 있다[1].

3. 실험결과 및 검토

성형 필터로 RTPZD와 RBTRC를 사용한 경우, AWGN 환경에서 BER 값을 컴퓨터 모의실험으로 측정한다. 실험에서 $\alpha = 0.5$, 필터의 길이는 심볼 시간의 8배, 그리고 E_b/N_0 는 0에서 10dB 사이로 설정하였다. 그리고 실험에 사용된 비트의 수는 4×10^6 개로 하였다. 그림 2에 matched 필터를 적용한 경우의 BER 측정 결과를 제시하였다. 여기에는 이론적인 BER 값과 모의실험으로 구한 RRC의 결과도 비교의 목적으로 같이 제시하였다. 실험 결과로부터 RTPZD 및 RBTRC 필터를 적용한 시스템의 모의실험 결과는 이론적인 결과와 잘 일치하여, 모의실험 과정이 타당함을 알 수 있다. 그리고 RTPZD, RBTRC 및 RRC 필터를 적용한 수신기들은 모두 동일한 성능을 보이는데, 이는 백색 가우시안 잡음환경에서 모두 matched 필터링을 통한 최적 검출을 수행하였기 때문이다.

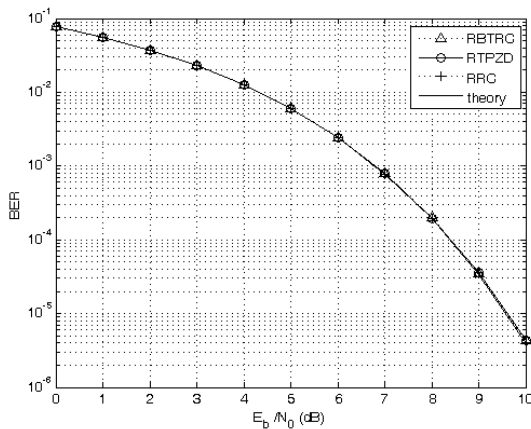


그림 2. 성형 필터에 따른 BER 비교

다음으로 채널의 전송대역폭이 감소하는 경우, 각 성형 필터를 적용한 시스템이 어느 정도의 성능 저하를 겪는가를 분석하기 위한 모의실험을 수행하였다. 펄스 성형된 송신 신호는 그림 1에서 제시된 것과 같이 저역통과 필터 $h(t)$ 의 입력으로 인가된다. 수신 신호는 저역통과 필터의 출력 신호와 AWGN 성분이 합쳐진 것으로 주어진다. 저역통과 필터는 10차의 IIR(infinite impulse response) 필터로 구성하였으며, 모의실험은 필터의 -3dB 주파수(이를 f_c 라 표기한다)를 $1.7B_0$, $1.5B_0$, 그리고 $1.3B_0$ 로 감소시켜가며 수행하였다.

그림 3에 $f_c = 1.7B_0$ 의 대역제한 채널을 적용한 경우, 시스템의 BER 측정 결과를 제시하였다. 여기에는 비교의 목적으로 이론적인 BER 값도 함께 제시하였다. 그림 3의 결과로부터, $f_c = 1.7B_0$ 인 대역제한 채널 환경에서 성형 필터를 적용한 시스템은 이론적인 결과값과 비교하였을 때 약간의 성능 저하를 보이지만, 그 성능 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

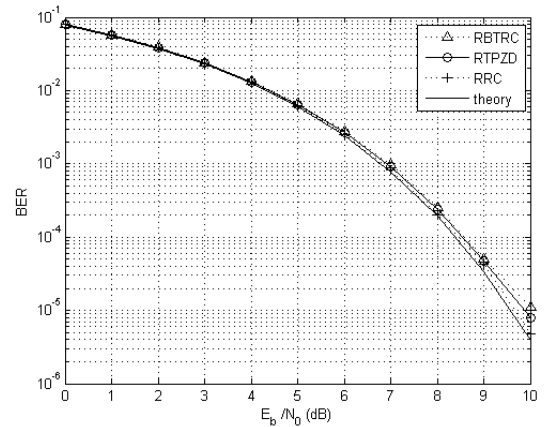


그림 3. 전송대역폭을 감소시킨 경우 성능 비교($f_c = 1.7B_0$)

그림 4와 그림 5에는 $f_c = 1.5B_0$ 와 $f_c = 1.3B_0$ 인 채널 환경에서 실험한 결과를 각각 제시하였다. 그림 4와 그림 5의 결과로부터, 채널의 전송대역폭이 감소됨에 따라 시스템의 BER 성능은 점차 저하됨을 알 수 있다. 그림 4의 결과로부터, BER = 10^{-4} 에서 이론적인 결과와 비교하여 RBTRC는 약 0.75dB, 그리고 RTPZD는 약 0.63dB의 전력 손실이 있음을 관찰할 수 있다.

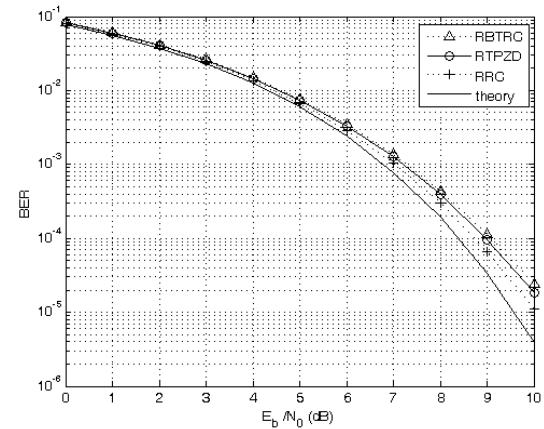


그림 4. 전송대역폭을 감소시킨 경우 성능 비교($f_c = 1.5B_0$)

전송 채널의 대역폭을 크게 감소시킨 그림 5의 결과에서 성형 필터를 적용한 시스템의 성능은 비교적 큰 폭으로 저하됨을 알 수 있다. 성능 저하는 RBTRC에서 가장 크게 발생한다. 그림 5의 결과로부터, $BER = 10^{-4}$ 에서 이론적인 결과와 비교하여 RBTRC는 약 1.25dB, 그리고 RTPZD는 약 0.94dB의 전력 손실이 있음을 관찰할 수 있다.

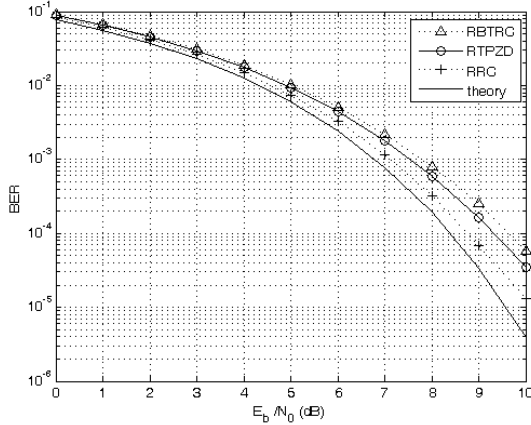


그림 5. 전송대역폭을 감소시킨 경우 성능 비교($f_c = 1.3B_0$)

그림 6에서 채널 전송대역폭의 감소에 따른 각 시스템의 성능 저하값을 비교 제시하였다. 그림에서 세로축은 $BER = 10^{-4}$ 에서 이론적인 BER 값과 비교하였을 때 발생하는 전력의 손실값을 나타낸 것이다. 그리고 가로축은 B_0 으로 정규화한 채널의 전송대역폭을 나타낸다. 여기서 성형 펄스의 roll-off 값 α 는 0.5로 설정하였다. 본 논문에서 고려한 모든 성형 필터의 차단 주파수 값은 $1.5B_0$ 이므로, 이론적으로는 이 보다 넓은 전송대역폭을 가지는 채널 환경에서는 BER 성능이 영향을 받지 않아야 한다. 그러나 모의실험에서는 실제 환경과 같도록 성형 펄스의 길이를 유한하게 제한하였으므로, 성형 펄스의 스펙트럼 성분이 $|f| > 1.5B_0$ 인 영역에서 나타난다. 그러므로 $1.5B_0$ 보다 넓은 대역폭을 가지는 전송 채널 환경에서도 시스템의 BER 성능이 영향을 받을 수 있다.

그림 6의 결과에서 채널의 f_c 가 $1.7B_0$ 인 경우, 시스템의 성능은 채널의 대역제한으로 인하여 영향을 받지만 그 크기는 크지 않음을 알 수 있다. 특히 RRC에서 그 영향은 매우 작음을 관찰할 수 있다. 반면 RTPZD와 RBTRC에서 상대적으로 대역제한된 채널의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 채널의 전송대역폭을 나타내는 f_c 값이 $1.5B_0$, $1.3B_0$ 등으로 감소하게 되면, 시스템의 성능은 이에 따라 크게 저하된다. 여러 성형 필터를 사용하는 시스템 가운데서, 가장 큰 성능 저하는 RBTRC를 사용한 시스템에서 발생한다. 그리고 RTPZD를 사용한 시스템의 성능 저하는 그 다음으로 크다. RRC를 적용한 시스템은 채널대역폭 감소에 의한 영향을 상대적으로 적게 받는다.

이상의 결과로부터 제한된 길이의 성형 펄스를 적용한 시스템의 BER 성능은 대역제한 채널에 영향을 받으며, 채널의 대역폭이 감소하면 BER 성능이 저하됨을 관찰하였다. 특히 RBTRC 시스템은 RTPZD 및 RRC를 적용한 시스템과 비교하였을 때, 채널의 대역폭 감소에 더욱 민감하여 BER 성능이 더 크게 저하됨을 알 수 있었다. RBTRC 펄스는 심볼 타이밍 오차에 덜 민감한 장점이 있지만, 대역제한된 채널에서는 성능의 저하가 크므로 이러한 환경에서는 성형 펄스로

RTPZD 또는 RRC를 적용하는 것이 더 유리하다고 판단된다.

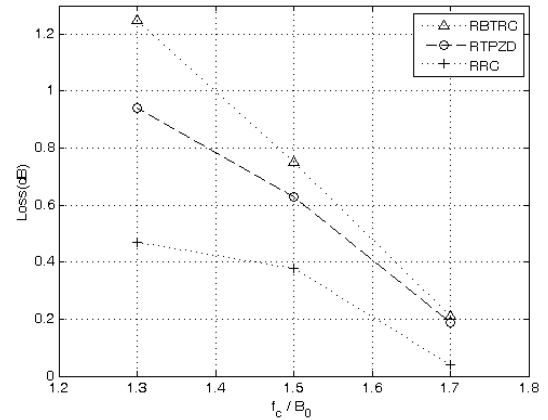


그림 6. 채널 전송대역폭의 감소에 따른 성능 저하 비교

4. 결론

본 논문에서는 채널의 전송대역폭이 제한되는 환경에서 성형 펄스로 RTPZD와 RBTRC를 적용한 시스템의 BER 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 비교 분석하였다. 그리고 모의실험에는 비교의 목적으로 RRC를 적용한 시스템도 함께 포함하였다. 모의실험 결과 RBTRC는 RTPZD를 적용한 시스템보다 채널의 전송대역폭 제한에 더욱 민감하여, 채널 대역폭이 협소하여짐에 따라 RBTRC 시스템의 BER 성능이 RTPZD 시스템보다 더 큰 폭으로 저하됨을 관찰할 수 있었다. RBTRC 펄스는 심볼 타이밍 오차에 다른 성형 펄스보다 덜 민감한 장점이 있지만, 대역제한된 채널에서는 성능 저하가 크므로 성형 펄스로 RTPZD 또는 RRC 펄스를 적용하는 것이 더 유리하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] N. C. Beaulieu, C. C. Tan, and M. O. Damen, "A "better than" Nyquist pulse," *IEEE Communications Letters*, Vol. 5, No. 9, pp. 367-368, Sep. 2001.
- [2] P. Tan and N. C. Beaulieu, "Reduced ICI in OFDM systems using the "better than" raised-cosine pulse," *IEEE Communications Letters*, Vol. 8, No. 3, pp. 135-137, Mar 2004.
- [3] S. Haykin and M. Moher, *Introduction to Analog & Digital Communications*, 2nd ed., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
- [4] E. Peiker, W. G. Teich, and J. Linder, "Windowing in the receiver for OFDM systems in high-mobility scenarios," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 41, pp. 57-65, May 2009.
- [5] 정영모, "대역제한된 채널에서 펄스 성형 필터의 성능 비교," *공학연구*, Vol. 7, No. 3, pp. 1-6, 2009년 11월.