

SC-FDE 수신 신호의 잔여 위상회전에러 제거

*김지현, **김환우
국방과학연구소, 충남대학교
e-mail : luke@add.re.kr, wwkim@cnu.ac.kr

Elimination of Residual Phase Rotation Errors in SC-FDE Received Signals

*Ji-Heon Kim, **Whan-Woo Kim
Agency for Defense Development, Chungnam National University

Abstract

Similar to Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), a Single Carrier with Frequency Domain Equalization (SC-FDE) system is computationally efficient since equalization is performed on a block of data in the frequency domain. In coherent QAM schemes, the mean phase rotation error caused by the residual carrier frequency offset may lead to serious degradation. When the frequency equalizer is combined with the mean phase error tracking algorithm, its performance can be enhanced noticeably.

I. 서론

SC-FDE(Single Carrier with Frequency Domain Equalization) 기법은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)과 유사한 구성 특성을 지니고 있으며, 상대적으로 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio) 문제에 덜 민감한 장점이 있어 OFDM의 대안 내지는 공존 가능성을 지니고 있다[1]. 본 논문에서는 SC-FDE 시스템에 대해 고찰해 보고, 특별히 시변 채널의 도플러 주파수에 의해 야기되는 잔여 평균위상에러 성분을 보상할 수 있는 결정 지향 방식의 추적 알고리즘을 설계하고 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

II. 본론

2.1 SC-FDE 시스템

SC-FDE 시스템은 OFDM의 송신부에 있는 IDFT(Inverse Discrete Fourier Transform)가 수신부

로 이동한 구조를 지니고 있으며, OFDM과 마찬가지로 CP(Cyclic Prefix)가 송신 신호에 삽입될 수 있다. SC-FDE 시스템에서는 시간 영역의 수신 신호가 주파수 등화후 시간 영역으로 다시 전환되므로, 각각의 심벌 에너지가 가용 주파수 대역 전체로 분산되는 효과가 있다. CP 제거후 SC-FDE 시스템의 수신 신호 \mathbf{r} 은 다음과 같이 주파수 신호 \mathbf{R} 로 변환된다.

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{n} = \mathbf{F}\mathbf{F}^H\mathbf{\Lambda}\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{n} = \mathbf{\Lambda}\mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (1)$$

여기에서 \mathbf{H} 는 채널 행렬, \mathbf{x} 는 송신 심벌 벡터, \mathbf{n} 은 잡음 성분, $\mathbf{\Lambda}$ 는 채널 \mathbf{H} 의 eigenvalue로 구성된 대각선 행렬이다. \mathbf{F} 는 DFT 행렬이며, \mathbf{F}^H 는 \mathbf{F} 의 복소 전치 행렬을 나타낸다. ZF(Zero Forcing) 등화후의 벡터 \mathbf{Y}_{ZF} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Y}_{ZF} = \mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{R} = \mathbf{X} + \mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{N} \quad (2)$$

식 (2)를 IDFT하면, 시간 영역의 수신 신호는

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{ZF} &= \mathbf{F}^H\mathbf{C}\mathbf{R} = \mathbf{F}^H\mathbf{C}\mathbf{\Lambda}\mathbf{X} + \mathbf{F}^H\mathbf{C}\mathbf{N} \\ &= \mathbf{F}^H\mathbf{X} + \mathbf{F}^H\mathbf{C}\mathbf{N} = \mathbf{x} + \mathbf{F}^H\mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{F}\mathbf{n} \end{aligned} \quad (3)$$

으로 표현될 수 있으며, 여기에서 \mathbf{C} 는 등화기 계수 행렬이다. 여기에서 잡음 증폭 문제가 있는 ZF 대신 MMSE(Minimum Mean-Square Error) 기법으로 심벌 간과 잡음간의 절충을 도모할 수 있다.

2.2 잔여 평균위상에러 보상

OFDM에서는 광대역의 주파수 선택성 채널을 협대역 부채널의 합으로 근사화할 수 있으며[2], SC-FDE에서도 유사한 방식으로 식을 전개할 수 있다. 따라서 주파수 편차 성분 ϵ 을 고려하여 주파수 영역의 SC-FDE 수신 신호 $R(k)$ 는 다음과 같이 전개할 수 있

다.

$$\begin{aligned}
 R(k) &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(k)H(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn} = X(k)H(k) \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\theta(n)} \\
 &\approx X(k)H(k) + jX(k)H(k) \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \theta(n) \\
 &= X(k)H(k)(1 + j\theta_{avg}) \approx X(k)H(k)e^{j\theta_{avg}}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

식 (4)의 결과를 통해, 등화된 심벌에서 추가로 잔여 위상여러 성분 θ_{avg} 를 제거함으로써 수신 성능을 향상시킬 수 있음을 인지할 수 있다. Gradient 방식에 의거, $j+1$ 번째 블록에서의 결정 심벌 $a(j+1,n)$ 과 등화 심벌 $y(j+1,n)$ 에 대해 평균위상여러의 갱신 알고리즘은 $\theta_{avg}(j+1) = \theta_{avg}(j) - \alpha E\{\text{Im}(a(j+1,n)y^*(j+1,n))\}$ (5) 으로 표현되며, 여기에서 α 는 위상 추적회로의 루프 여파기 이득이다.

III. 시뮬레이션 결과

표 1. 시뮬레이션 환경

구분	설정
펄스 성형 여파기	root-raised cosine filter with roll-off factor of 0.5
변복조 방식	QPSK
채널	Rayleigh Model with 6 taps $f_d T_s = 1 \times 10^{-4}$
CP 길이	16
CAZAC 길이	32
데이터 블록 길이	16
FFT 크기	64

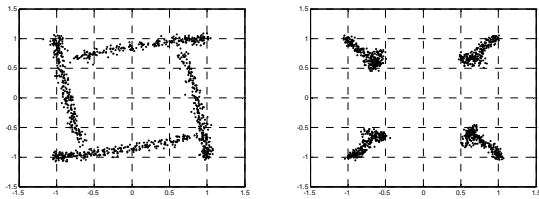


그림 1. 평균위상여러 보상전후 정상도(SNR=15dB)

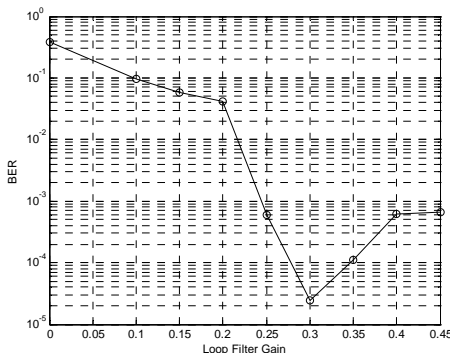


그림 2. 루프 여파기 이득별 성능(SNR=15dB)

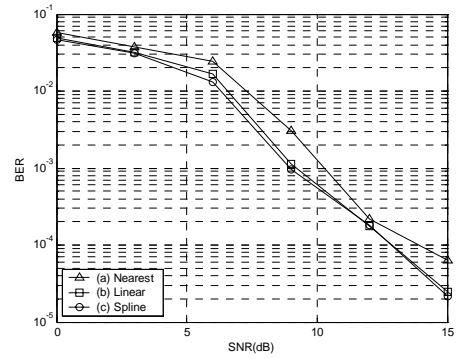


그림 3. 보간법별 BER 비교

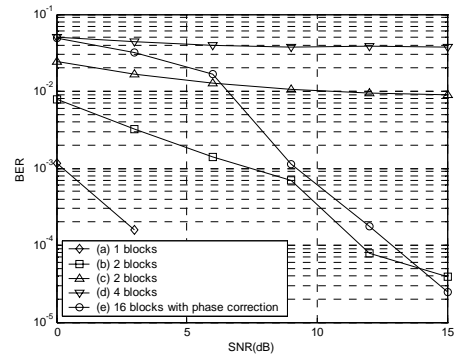


그림 4. 데이터 블록 길이에 따른 성능 열화

그림 1은 평균위상여러를 정정하기 전후의 정상도이며, 그림 2는 위상 추적회로의 루프 여파기 이득에 따른 BER 결과이다. 그림 3은 파일럿 심벌로 사용한 CAZAC(Constant Amplitude with Zero Auto-Correlation) 시퀀스를 통해 구한 등화기 계수를 세 가지 보간 기법으로 추정된 비교 결과를 보여주고 있다. 그림 4는 평균위상여러 추적회로의 작동 여부에 따른 데이터 블록 크기별 BER 결과이다.

IV. 결론

본 논문에서 적용한 결정 지향 방식의 경우 추가적인 파일럿이 소요되지 않으므로 전송 효율에 영향을 주지 않으며, 표준에 구애 받지 않고 SC-FDE 시스템의 수신 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

참고문헌

[1] D.Falconer, S.Ariyavisitakul, A.Seeyar, and B.Eidson, "Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems," IEEE Comm. Magazine, pp.58-66, Apr. 2002.

[2] A.G.Armada, "Understanding the Effects of Phase Noise in Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)," IEEE Trans. on Broadcasting, Vol. 47, pp.153-159, June 2001.