

비직교 신호 송수신을 위한 간섭제거 및 신호검출기술

백명선¹, 송형규^{1,2}¹ 세종대학교 전자정보통신공학과, ² 세종대학교 지능형드론융합전공

msbaek@sejong.ac.kr, songhk@sejong.ac.kr

Interference Cancellation and Signal Detection Technology for Non-Orthogonal Signal Communication Systems

Myung-Sun Baek¹, Hyoung-Kyu Song^{1,2}¹Department of Information and Communication Engineering and, ²Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University

요약

FTN 신호 전송은 높은 스펙트럼 효율을 위한 유용한 전송 기술이다. 그러나 나이퀴스트 속도보다 빠른 심볼 속도를 사용하면 심볼 간의 직교성이 파괴되므로 불가피하게 심볼 간 간섭 (ISI)이 발생한다. ISI 효과를 줄이기 위해 FTN 수신기에 간섭 제거 및 신호 검출 프로세스가 필요하다. 일반적으로 Trellis 알고리즘을 기반으로 하는 간섭 제거 기술은 ISI 감소에 사용된다. Trellis 알고리즘의 복잡도는 State 수의 증가에 따라 크게 증가하고 간섭 심볼의 증가는 State 수를 기하급수적으로 증가시킨다. ISI 제거 프로세스의 복잡도를 줄이기 위해 본 논문에서는 FTN 신호 전송을 위한 Partial ML 기술을 제안한다. 제안된 방식은 수신된 프레임에 동일한 길이의 블록으로 나누고 각 블록에 ML 검출을 적용한다. 제안된 방식의 복잡도는 기존 BCJR 알고리즘보다 매우 낮은 복잡도로 FTN의 ISI를 효과적으로 제거하고 신호를 검출할 수 있다.

I. 서론

통신시스템의 스펙트럼 효율성을 높이기 위해 Faster-Than-Nyquist (FTN) Signaling이 상당한 주목을 받았다. FTN 신호는 1970 년대에 Mazo [1]에 의해 제안되었으며, 그의 연구는 이진 데이터와 이상적인 동기 파형을 채택할 때 나이퀴스트 속도보다 최대 25% 빠른 전송 속도에서 최소 거리에 손실이 없음을 보여주었다. 최근, M 진 데이터 심볼과 Root Raised Cosine (RRC) 펄스를 포함한 실제 통신 환경에 대해 FTN 신호가 연구되었다 [2]. FTN 방식의 주요 목적은 대역폭, 전송 전력 또는 안테나 수를 변경하지 않고 전송 속도를 높이는 것이다. 전송 속도를 높이기 위해 FTN 방식은 나이퀴스트 속도보다 빠른 심볼 속도를 채택한다[2]. 일반적인 통신 시스템에서 나이퀴스트 속도 기준은 심볼 간 간섭(ISI) 없이 최대 전송 속도를 달성하는 데 사용된다. FTN 신호는 나이퀴스트 속도보다 높은 속도를 사용하기 때문에 필연적으로 ISI가 발생한다. 기존의 ISI 제거 기술은 ML 시퀀스 추정(MLSE) 기술과 Viterbi 알고리즘(VA)이다. 이후, Bahl, Cocke, Jelinek 및 Raviv(BCJR) 알고리즘이 FTN 신호의 ISI 제거를 위해 사용되었다 [2]. 따라서 지금까지 FTN 신호의 경우 대부분의 ISI 제거 방식은 Trellis 디코더를 고려했다. Trellis 디코더에서 State 수는 일반적으로 간섭 심볼 수와 변조 차수의 증가를 통해 기하급수적으로 증가한다. 따라서 Trellis 디코더의 계산 복잡도는 매우 어려운 문제이다. 성능 저하 없이 수신기 복잡도를 줄이기 위해, 본 연구는 FTN 신호에 대한 Partial Maximum Likelihood

(PML) 기법을 제안한다. 제안된 방식은 수신된 프레임에 같은 길이의 블록으로 나누고, 각 블록에 ML 검출을 적용한다. 신호 검출 성능을 개선하기 위해 간섭 제거는 예비 검출과 정제된 검출의 두 단계로 구성된다. 제안된 방식의 복잡도는 기존 BCJR 알고리즘의 복잡도보다 현저히 낮지만, 매우 유사한 BER 성능을 제공하는 것이 가능하다.

II. FTN 기반의 물리계층 보안 기술

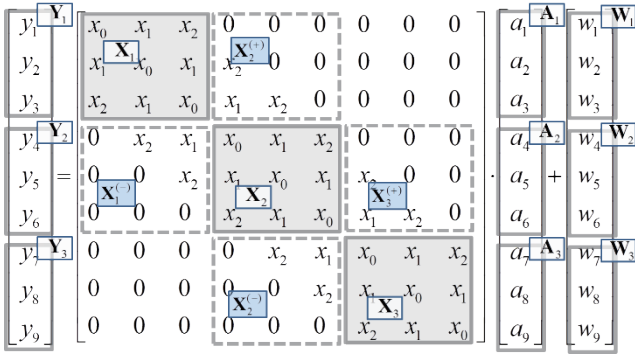
FTN 기반의 송신 신호는 다음 수학적식과 같다.

$$s(t) = \sum_k a_k \bullet g(t - k\tau T), \quad (1)$$

상기 수학적식에서 $g(t)$ 는 송신 펄스이며, 해당 펄스의 대역폭은 $W = \frac{1}{2\tau}$ 이다. 또한 a_k 는 M -ary 변조방식을 사용하는 전송신호이고, τ 는 FTN 변수를 나타낸다 ($0 \leq \tau \leq 1$). 수식 (1)과 같이 생성된 신호는 송신펄스의 나이퀴스트율인 $1/T$ 보다 $1/\tau$ 배 빠른 $1/\tau T$ 의 전송률로 심볼을 전송하여 주파수 효율이 높아지지만, 이 과정에서 심볼간 중첩에 의해 송신 신호에서부터 ISI가 발생한다. AWGN 채널을 통과한 후 matched filter를 통과한 수신 신호는 다음과 같다.

$$y(n\tau T) = \sum_k a_k \bullet x((n-k)\tau T) + w(n\tau T), \quad (2)$$

위의 식에서 $x(t) = g(t) * g(-t)^*$ 이고 w 은 matched filter를 통과한 가우시안 잡음이다.


 그림 1. $L=9, C=3, N=2$ 인 FTN signaling 신호 모델

이때 전송시퀀스의 길이 $L=6$ 개 이고 앞뒤 2 개의 심볼이 간섭을 주는 FTN 신호의 모델링은 다음 수학적식과 같이 나타낼 수 있다

$$\mathbf{Y} = \mathbf{XA} + \mathbf{W}$$

$$= \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_0 & x_1 & x_2 & 0 & 0 \\ x_2 & x_1 & x_0 & x_1 & x_2 & 0 \\ 0 & x_2 & x_1 & x_0 & x_1 & x_2 \\ 0 & 0 & x_2 & x_1 & x_0 & x_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & x_1 & x_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서 수신신호 \mathbf{Y} 는 전송신호 \mathbf{A} 와 펄스 계수 \mathbf{X} 의 곱으로 표현 가능하다.

III. 제안된 PML 검출 기술

본 절에서는 저복잡도의 FTN 간섭제거 및 신호 검출 기술을 제안한다. 본 절에서는 전송시퀀스의 길이가 L 인 시스템을 고려한다. 또한 PML 의 적용을 위해 한번에 C 길이의 심볼이 검출된다($C \leq L$). 그림 1 은 $C = 3, L = 9$ 인 FTN 신호를 나타낸다. 이때 간섭심볼은 앞뒤로 2 개의 심볼이 영향을 주게 되며 N 이라 나타낸다. 따라서 $N=2$ 이다. 제안된 검출은 2 단계로 수행된다. 우선 첫번째 단계에서는 대각행렬블록을 사용하여 1 차 신호 검출을 수행한다. 이때 그림에서와 같이 한번의 연산에서 3 개의 심볼로 구성된 블록이 검출되므로 첫 3 개의 심볼인 $\mathbf{A}_1 = [a_1, a_2, a_3]$ 은 다음과 같이 ML 방법으로 검출 할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{A}}_1 = \arg \min_{\mathbf{A}_1} \|\mathbf{Y}_1 - \mathbf{X}_1 \mathbf{A}_1\| \quad (4)$$

위와 같이 다음 심볼 블록 \mathbf{A}_2 과 \mathbf{A}_3 도 순차적으로 검출 가능하다. 이렇게 1 차 검출절차를 통해 검출된 신호를 $\hat{\mathbf{A}}$ 라 한다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이, 검출하고자 하는 심볼블록의 앞뒤로 간섭이 존재한다. \mathbf{A}_2 를 검출하는 경우 \mathbf{A}_2 블록의 앞뒤 블록이 간섭으로 존재하므로 정확한 검출이 어렵게 된다. 따라서 각 심볼 블록의 검출 시 앞뒤 블록간섭을 제거해야 한다. 2 차 간섭제거에서는 1 차 검출 심볼 $\hat{\mathbf{A}}$ 을 사용하여 앞뒤 심볼 간섭을 제거한 후 다시 대각블록을 검출하게 된다. 간섭 펄스 계수인 \mathbf{X} 의 부분행렬은 반복적인 구조를 갖고 있다. 검출하고자 하는 타겟 블록에 적용되는 대각 행렬은 모두 동일하다 ($\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_3$). 또한

이전 심볼 간섭에 적용되는 $\mathbf{X}_1^{(-)}$ 과 $\mathbf{X}_2^{(-)}$ 의 값도 동일하며 ($\mathbf{X}^{(-)} = \mathbf{X}_1^{(-)} = \mathbf{X}_2^{(-)}$), 이후 심볼 간섭에 적용되는 부분행렬의 값 또한 동일하다($\mathbf{X}^{(+)} = \mathbf{X}_2^{(+)} = \mathbf{X}_3^{(+)}$).

두 번째 검출 단계에서 \mathbf{A}_2 를 검출하는 경우, 우선 첫번째 검출절차를 통해 검출된 심볼을 사용하여 아래와 같이 간섭제거를 수행한다.

$$\mathbf{Y}_2' = \mathbf{Y}_2 - [\mathbf{X}^{(-)} \hat{\mathbf{A}}^{(1)}]. \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{Y}}_2 = \mathbf{Y}_2' - [\mathbf{X}^{(+)} \hat{\mathbf{A}}^{(3)}]. \quad (6)$$

이후 수학적식 4 와 같이 두번째 심볼블록의 심볼을 다음과 같이 검출한다.

$$\hat{\mathbf{A}}_2 = \arg \min_{\mathbf{A}_2} \|\tilde{\mathbf{Y}}_2 - \mathbf{X} \hat{\mathbf{A}}_2\| \quad (4)$$

이를 통해 최종 $\hat{\mathbf{A}}$ 가 검출된다.

IV. 성능검증 및 논의

그림 2 는 제안된 기술의 모의실험결과를 보여준다. 실험을 위해 QPSK 변조와 $\alpha=0.8$ 이 적용된 FTN 시스템이 고려되었다. 또한 성능 비교를 위해 BCJR 기법의 성능이 함께 포함되었다. 그림에서와 같이 부분 행렬크기가 증가함에 따라 한번에 검출되는 신호의 수가 증가하므로 성능이 증가하게 된다. 또한 $C=8$ 인 경우 BCJR 기법과 매우 유사한 성능을 도출하는 것을 확인할 수 있다.

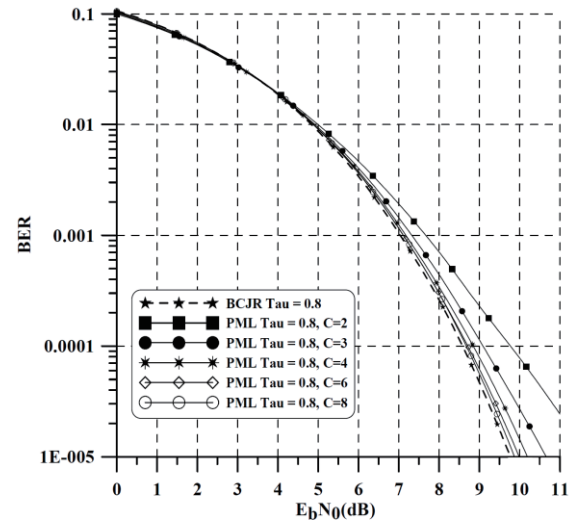


그림 2. 제안된 기술의 BER 성능

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024 년도 세종대학교 교내연구비 지원에 의한 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] J. E. Mazo, "Faster-than-Nyquist signaling," Bell Syst. Tech. J., vol. 54, pp. 1451-1462, Oct. 1975.
- [2] J. B. Anderson, A. Prija, F. Rusek, "New reduced state space BCJR algorithms for ISI channel," ISIT 2009, pp. 889-893, June 2009.