

FTN 기반 전송 시스템의 성능 평가 기준에 관한 연구

곽상운*, 윤정일°, 백명선*, 임형수*

Performance Evaluation Criterion of FTN-Based Transmission System

Sangwoon Kwak*, Jungil Yun°, Myungsun Baek*, Hyoungsoo Lim*

요약

FTN(Faster-Than-Nyquist) 전송 방식은 송신 펄스를 중첩시켜 동일한 대역폭 내에서 나이퀴스트(Nyquist) 율보다 빠른 속도로 심볼을 전송하는 기법이다. FTN 전송 방식을 적용하면 동일한 시간 구간 동안 나이퀴스트 전송 방식보다 많은 수의 심볼이 존재하게 되므로, 심볼 당 에너지가 같을 때 신호의 송신 전력이 커진다. 따라서 FTN 기반 전송 시스템의 올바른 성능 평가를 위해서는 이 점에 유의하여 성능 평가 기준을 설정하여야 하며, 기존 나이퀴스트 기반 전송 시스템에서 활용되던 성능 평가 기준 간의 환산 공식 또한 주의하여 활용할 필요가 있다. 본 논문에서는 FTN 전송 방식이 적용된 시스템에서의 성능 평가 기준과 관계식에 대해 분석하고 타당한 성능 평가 기준을 제시한다.

Key Words : Faster-Than-Nyquist Signaling, Performance Evaluation, Signal-to-Noise Ratio

ABSTRACT

FTN(Faster-Than-Nyquist) signaling is a method of transmitting symbols at rates faster than the Nyquist rate in the same bandwidth by overlapping transmission pulses. The transmission power of the FTN signal is greater than that of the Nyquist signal, because the number of symbols in the FTN signal is larger than that in the Nyquist signal for the same time interval. Hence, to evaluate the performance of an FTN-based transmission system properly, the performance evaluation criterion should be carefully set, and conversion formulas among the criteria which are used in Nyquist-based system should also be applied attentively. In this paper, the performance evaluation criteria of the FTN-based transmission system is analyzed and a valid way to set the criteria is proposed.

1. 서론

최근 방송 및 통신에서는 UHD(Ultra High Definition), 3D 콘텐츠를 포함한 다양한 형태의 초고용량 멀티미디어 서비스에 대한 요구가 증가하고 있

으며, 이로 인해 데이터 트래픽 부하가 급증할 것으로 예측되고 있다. Cisco 사는 2016년 2월에 발표한 세계 모바일 트래픽 전망에서 2020년 모바일 트래픽의 양이 2015년 대비 8배 이상 증가한 30.6 Exabytes/month가 될 것으로 예상하였다^[1]. 이처럼 급증하는

※ 본 연구는 미래창조과학부 정보통신·방송기술개발사업 (과제번호: B0101-16-1362, FTN(Faster-Than-Nyquist)기반 유무선 방송시스템 고도화 기술 개발)의 지원 하에 수행되었습니다.

♦ First Author : Dep. of Broadcasting System Research, ETRI, s.kwak@etri.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : Dep. of Broadcasting System Research, ETRI, sigipus@etri.re.kr, 정희원

* 한국전자통신연구원 방송·미디어연구소 방송시스템연구부 나노미디어전송연구실, sabman@etri.re.kr, lim@etri.re.kr, 종신희원
논문번호 : KICS2016-09-242, Received September 3, 2016; Revised November 1, 2016; Accepted November 1, 2016

데이터 트래픽을 수용하기 위해 차세대 방송 및 통신 시스템에서는 FTN(Faster-Than-Nyquist) 전송 기술, 비-직교 다중접속(NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access), 거대 배열 안테나(Massive Multi-Input Multi-Output)와 같은 다양한 주파수 효율 증대 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁻⁶⁾.

FTN 전송 방식은 1975년 James E. Mazo⁷⁾에 의해 처음 제안된 비직교 전송 기술로, 당시에는 높은 구현 복잡도로 인해 크게 주목을 받지 못하였으나 최근 직교 기반 전송기술의 한계를 넘을 수 있는 차세대 전송 기법 중 하나로 주목받으며 활발히 연구되고 있다⁸⁻¹²⁾. 송신 펄스 간 직교성을 유지하여 신호를 전송하는 나이퀴스트(Nyquist) 전송 방식과는 달리, FTN 전송 방식은 펄스 간 직교성을 유지하지 않고 중첩을 발생시켜 동일한 대역폭 내에서 심볼을 더 빠르게 전송함으로써 전송 효율을 향상시킬 수 있다. 이와 같이 심볼을 중첩시켜 전송하면 필연적으로 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference: ISI)이 발생하지만, 심볼이 중첩된 정도를 수신단에서 알고 있다면 간섭 제거 알고리즘 등을 통해 이를 제거하여 신호를 복원할 수 있고, 나아가 FTN 전송 방식에 최적화된 채널 부호와 간섭 제거 알고리즘을 결합¹¹⁾하는 등 다양한 기법을 통해 수신 성능을 향상시킬 수 있다. 연구 결과에 따르면, 주어진 시스템에서 상승 코사인(Raised Cosine)과 같이 이상적인 싱크(sinc)가 아닌 펄스 성형을 위해 시스템 대역폭의 일부를 사용한 경우 FTN 전송 방식을 적용하여 손실된 시스템 용량을 복원할 수 있고¹³⁾, 또한 FTN 전송 방식을 통해 낮은 변조 차수를 이용하면서도 높은 변조 차수를 이용하는 것과 유사한 시스템 용량을 얻을 수 있다¹⁴⁾.

방송 및 통신 시스템의 성능 평가를 위해 일반적으로 신호 대 잡음의 전력 또는 에너지 비에 따른 에러율(error rate)을 고려한다. 주어진 채널 환경에서 송신 전력이 같은 경우, 정보 비트 당 에너지가 같은 경우 등 필요와 실험 환경에 맞게 기준을 설정하고 그에 따른 에러율을 비교하여 시스템의 성능을 평가할 수 있다. 그러나 FTN 전송 방식은 송신 펄스 형태를 그대로 유지한 채 심볼을 중첩시켜 전송하므로, 심볼 당 에너지가 동일한 나이퀴스트 전송 방식보다 시스템의 송신 전력이 더 높아진다. 따라서 FTN 기반 시스템의 성능 평가 또는 나이퀴스트 기반 시스템과의 성능 비교 시 이 점에 유의하여 성능 평가 기준을 설정해야 하며, 기존 나이퀴스트 기반 시스템에서 활용되던 성능 평가 기준간의 환산 공식 또한 주의하여 적용하여야 한다. 본 논문은 FTN 기반 시스템의 올바른 성능

평가를 위해, 성능 평가 기준 및 환산 공식에 대해 분석하고 타당한 성능 평가 기준을 제시한다.

본 논문은 서론, 본론, 모의실험 및 토의, 그리고 결론으로 구성되어 있다. II장의 본론에서는 FTN 전송 방식과 평균 송신 전력, 그리고 FTN 기반 전송 시스템의 올바른 성능 평가 기준에 대해 기술하고, III장의 모의실험 및 토의에서는 FTN 기반 시스템과 나이퀴스트 기반 시스템의 성능 비교 실험 결과를 통해 II장에서 기술한 성능 평가 기준에 따른 해석 차이를 분석한다. 끝으로 IV장에서는 본론과 실험 및 토의의 내용을 종합하여 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 본론

2.1 FTN 전송 방식과 평균 송신 전력

본 논문에서는 식 (1)과 같은 FTN 신호를 고려한다.

$$s(t) = \sum_k a_k h(t - k\tau T) \quad (1)$$

여기서 $\{a_k\}$ 는 데이터 심볼 열이고 τ 는 $0 < \tau \leq 1$ 범위의 값을 갖는 FTN 인자, $h(t)$ 는 잡음 등가 대역폭(noise equivalent bandwidth) $B = 1/T$ [Hz]를 가지는 송신 펄스이다. 식 (1)과 같이 생성된 FTN 신호는 송신 펄스의 나이퀴스트 전송 주기인 T 보다 τ 만큼 짧은 τT 의 전송주기로 심볼을 전송하여 동일한 대역폭 내에서 전송 효율을 높일 수 있다. 그림 1은 FTN 신호 파형의 예를 나타낸다.

FTN 송신 신호는 그림 2와 같은 FTN 송신부 구조를 통해 생성될 수 있다. 그림 2에 나타난 바와 같이, 보내고자 하는 정보 비트열은 변조부를 통해 데이터 심볼열로 변조되어 FTN 펄스 성형부로 입력되는데, 여기서 FTN 펄스 성형부는 업샘플링(up-sampling)과정과 송신 필터링 과정으로 구성될 수 있다. 업샘플링

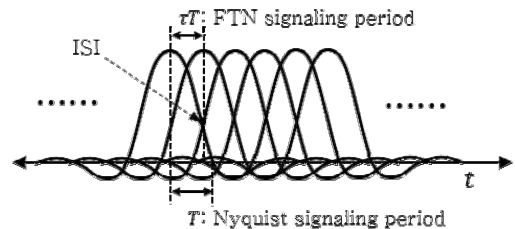


그림 1. FTN 신호 파형의 예
Fig. 1. An instance of the FTN signal

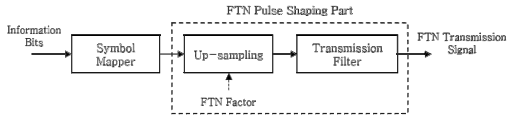


그림 2. FTN 기반 시스템의 송신부 구조 예
Fig. 2. A transmitter structure of the FTN-based system

과정은 변조된 심볼을 FTN 인자에 따라 변경되는 업샘플링 율로 업샘플링하여 심볼 간의 간격을 결정하는 역할을 한다. 예를 들어 $\tau = 0.5$ 인 FTN 송신 신호를 생성한다고 하면, 송신 펄스의 나이퀴스트 전송 주기보다 2배 빠른 주기로 데이터 심볼이 위치할 수 있도록 업샘플링 율을 나이퀴스트 전송 방식 대비 1/2배로 하여 업샘플링된 신호를 출력한다. 그리고 송신 필터는 FTN 인자와 무관하게 항상 같은 대역폭을 갖도록 대역 제한 필터링을 하여 FTN 송신 신호를 얻을 수 있다.

이와 같이 생성된 FTN 송신 신호는 심볼 간 중첩에 의해 단위 시간당 전송하는 심볼의 수가 나이퀴스트 전송 방식보다 많아지게 된다. 따라서 심볼 당 에너지(E_S)가 동일할 경우, 나이퀴스트 율을 만족하는 송신 신호 보다 송신 전력이 높아진다. 그림 3은 동일한 심볼 당 에너지를 가지는 나이퀴스트 전송 방식과 FTN 전송 방식의 송신 신호 및 신호 RMS(Root Mean Square) 수준을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 송신 신호에 적용된 τ 에 따라 신호 RMS 수준이 높아지고 송신 전력이 증가하게 된다.

2.2 방송 및 통신 시스템의 성능 평가 기준

방송 및 통신 시스템의 성능을 평가하거나 서로 다른 시스템간의 성능을 비교할 때, 일반적으로 신호와 잡음의 전력 또는 에너지 비에 따른 에러율(error rate)을 고려한다. 대표적으로 다음과 같은 신호와 잡음의 비가 평가 기준으로 활용된다.

- 1) E_S/N_0 : 심볼 당 에너지 대 잡음 전력 스펙트럼 밀도의 비
- 2) E_b/N_0 : 비트 당 에너지 대 잡음 전력 스펙트럼 밀도의 비
- 3) S/N : 신호 전력 대 잡음 전력의 비

위의 평가 기준들은 시스템의 평가 목적 및 실험 환경에 따라 적합한 값으로 설정되며, 필요에 따라 관계식을 통해 상호 환산하여 활용할 수 있다. 그러나 FTN 전송 방식이 적용되어 송신 전력이 높아지게 되면, 기존의 평가 목적에 따른 평가 기준 설정이 유효

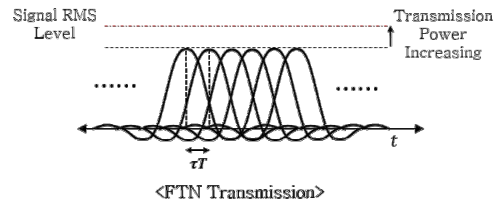
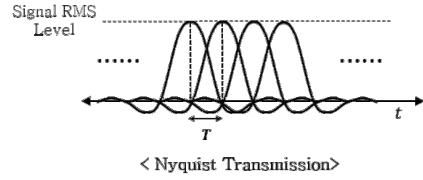


그림 3. 나이퀴스트 신호와 FTN 신호의 송신 전력 비교
Fig. 3. Transmission power comparison between the Nyquist signal and the FTN signal

하지 않을 수 있다. 또한 기존의 평가 기준 간 환산 공식 중 일부는 나이퀴스트 전송 방식을 가정하고 있어, FTN 기반 시스템에서 적용할 수 없는 경우가 생기므로 이에 유의하여야 한다. 본 논문의 다음 절에서는 FTN 기반 시스템에서의 성능 평가 기준 설정과 환산 공식에 대해 분석한다.

2.3 FTN 기반 전송 시스템의 성능 평가 기준

일반적으로 S/N 과 E_S/N_0 간에는 아래와 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{S}{N} = \frac{E_S}{N_0} \cdot \frac{R_S}{B} \tag{2}$$

여기서 R_S 는 심볼율 [symbols/sec]이다.

나이퀴스트 기반 시스템에서는 심볼율 $R_{S_{Nyq}}$ 와 대역폭 B 가 동일하므로 식 (2)가 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{S}{N} = \frac{E_S}{N_0} \tag{3}$$

즉 나이퀴스트 기반 시스템은 S/N 과 E_S/N_0 가 동일하기 때문에, E_S/N_0 를 평가 기준으로 설정하면 동일 송신 전력 기준의 성능 평가가 가능하다.

반면 FTN 기반 시스템에서는 FTN 인자 τ 에 대해 FTN 심볼율 $R_{S_{FTN}}$ 이 $(1/\tau) \cdot R_{S_{Nyq}}$ 이고, 대역폭 B 는 동일하게 $R_{S_{Nyq}}$ 이기 때문에 아래와 같은 관계가

성립한다.

$$\frac{S}{N} = \frac{E_s}{N_0} \cdot \frac{R_{FTN}}{B} = \frac{E_s}{N_0} \cdot \frac{1}{\tau} \quad (4)$$

식 (4)로부터, 동일한 E_s/N_0 에서 FTN 전송 방식은 같은 잡음 전력에 대해 송신 전력이 $1/\tau$ 배이며, 그림 2의 평균 송신 전력 증가량이 $1/\tau$ 배라는 것을 알 수 있다. 이를 시뮬레이션을 통해 확인한 결과를 그림 4에 도시하였다. $1/\tau$ 를 FTN 가속율로 정의할 때 그림 4는 심볼 당 에너지가 동일한 조건에서 FTN 가속율($1/\tau$)에 따른 송신 전력 비를 도시한 것으로, FTN 가속율이 증가함에 따라 송신 전력도 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 그러므로 기존의 E_s/N_0 기준으로 나이퀴스트 기반 시스템과 FTN 기반 시스템의 성능을 비교하거나, 서로 다른 τ 를 갖는 FTN 기반 시스템 간의 성능을 비교하는 것은 동일 송신 전력 기준의 성능 평가가 아니므로 이에 유의하여야 한다.

한편 E_b/N_0 와 S/N 간에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{R_b}{B} = \frac{S}{N} \quad (5)$$

여기서 R_b 는 정보 비트의 데이터율 [bps]이다. 식 (5)에서 확인할 수 있듯이 R_b/B , 즉 주파수 이용 효율(spectral efficiency)이 같은 경우 S/N 이 E_b/N_0

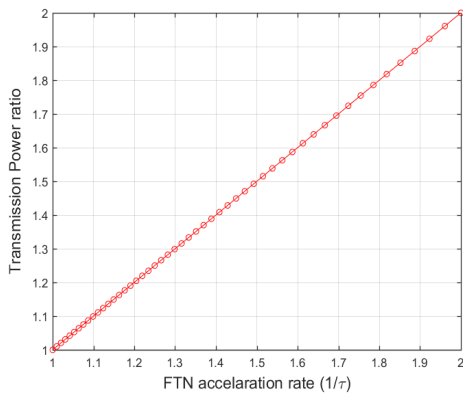


그림 4. FTN 가속율($1/\tau$)에 따른 상대적 송신 전력
Fig. 4. Relative transmission powers according to the FTN acceleration rate ($1/\tau$)

에 일정한 비율로 비례한다. 따라서 주파수 이용 효율이 같은 나이퀴스트 기반 시스템과 FTN 기반 시스템은 E_b/N_0 를 기준으로 동일 송신 전력 기준의 비교가 가능하다. 이를테면 16-QAM 변조방식이 적용된 나이퀴스트 기반 시스템과 QPSK 변조 방식에 $\tau = 0.5$ 가 적용된 FTN 기반 시스템은 부호화율이 같다면 R_b/B 가 같고, 따라서 E_b/N_0 에 따른 비트오율(Bit Error Rate: BER) 성능 비교를 통해 동일 송신 전력 기준의 성능 비교 평가를 할 수 있다.

또한 기존의 나이퀴스트 기반 시스템의 주파수 이용 효율 η_{NYQ} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_{NYQ} = \frac{r \cdot \log_2 M \cdot R_{S_{NYQ}}}{B} = r \cdot \log_2 M \quad (6)$$

여기서 r 은 채널 부호의 부호화율, M 은 변조차수이다. 식 (6)으로부터, E_s 와 E_b 의 정의에 기반한 관계식

$$\frac{E_b}{N_0} \cdot r \cdot \log_2 M = \frac{E_s}{N_0} \quad (7)$$

은 아래와 같이 환산될 수 있다.

$$\frac{E_b}{N_0} \cdot \eta_{NYQ} = \frac{E_s}{N_0} \quad (8)$$

식 (8)은 기존 나이퀴스트 기반 시스템에서 E_b/N_0 기준의 성능과 E_s/N_0 기준의 성능을 상호 환산하여 도출할 때 활용되는 환산 공식이다¹⁵⁾. 그러나 FTN 기반 시스템의 경우 주파수 이용 효율(η_{FTN})이 아래와 같이 정의된다.

$$\eta_{FTN} = \frac{r \cdot \log_2 M \cdot R_{S_{FTN}}}{B} = \frac{r \cdot \log_2 M \cdot R_{S_{NYQ}}}{B \cdot \tau} \quad (9)$$

식 (6)을 식 (9)에 대입하면,

$$\eta_{FTN} = \frac{\eta_{NYQ}}{\tau} \quad (10)$$

이 된다. 따라서 FTN 기반 시스템에서는 주파수 이용 효율을 이용한 기존의 환산 공식 (8)을 사용하여 E_b 와

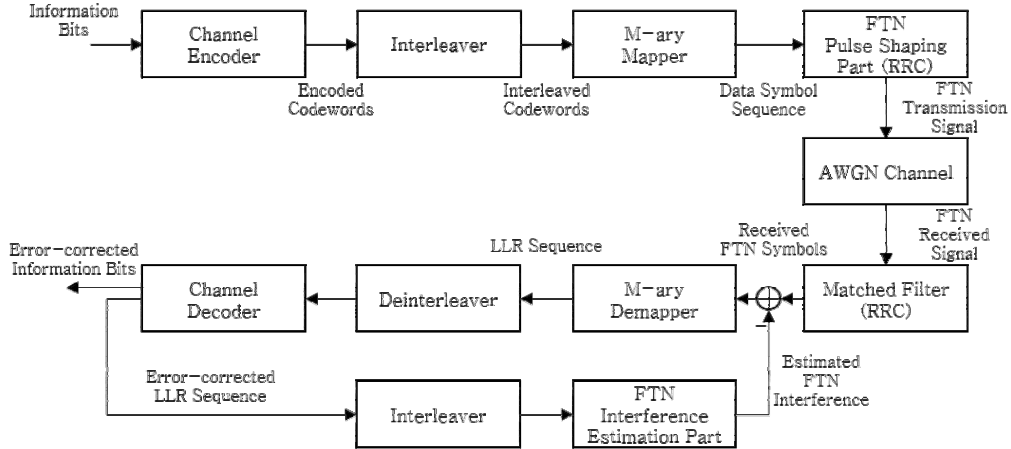


그림 5. FTN 기반 시스템 시뮬레이터 구조도
Fig. 5. A schematic of the FTN-based system simulator

E_s 를 환산하는 것은 맞지 않고, 관계식 (7)을 이용하여야 한다.

III. 모의실험 및 토의

본 장에서는 FTN 기반 시스템과 나이퀴스트 기반 시스템의 시뮬레이션 BER 성능 비교를 통해, 평가 기준에 따른 결과 해석 차이에 대해 알아본다.

시뮬레이터의 개략적인 구조도는 그림 5와 같다. 먼저 정보 비트열은 채널 부호화부를 통해 부호화되는데, 본 시뮬레이션에서는 DVB-T2 표준의 LDPC (Low Density Parity Check) 부호 중 64800bits 길이의 부호^[16]을 이용하였다. 채널 부호화된 코드워드열은 인터리버(interleaver)를 거친 뒤 M진 변조되고, II-1절에서 설명한 FTN 펄스 성형부를 통해 펄스 성형되어 FTN 송신 신호가 생성된다. 송신 필터는 roll-off가 0.35인 RRC(Root Raised Cosine) 필터를 사용하고, 수신단에서는 송신 필터에 정합된 RRC 필터를 이용하여 수신한다. 채널은 평균이 0이고 분산이 $N_0/2$ 인 가산성 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise: AWGN) 채널을 고려하였고, 정합 필터를 통과한 수신 신호는 송신 심볼율과 동일한 $1/\tau T$ 로 다운샘플링(down-sampling)되어 출력된다. M진 복조부는 다운샘플링 된 수신 FTN 심볼열로부터 로그우도비(Log-Likelihood Ratio: LLR)를 계산하여 출력하고, 출력된 LLR열은 디인터리버(deinterleaver)를 거쳐 채널 복호화된다. 이 때 채널 복호화부는 코드워드길이의 오류가 정정된 LLR열(또

는 비트열)을 출력하며, 이를 이용하면 FTN 간섭 추정부를 통해 수신 신호에 포함된 FTN 간섭을 추정할 수 있다. 그림 5의 구조도에서 FTN 간섭 추정부는 그림 6과 같이 자세히 나타낼 수 있다. 먼저 인터리빙된 채널 복호화부 출력을 M진 변조하여 추정된 심볼열을 생성하고, FTN 간섭 필터를 통해 FTN 간섭을 추정한다. 여기서 FTN 간섭 필터는 송신 필터와 정합 필터의 컨벌루션(convolution) 연산으로 얻어지는 RC 필터에서, FTN 인자에 맞게 심볼간 간섭 위치를 샘플링(sampling)하여 계수를 얻고, 심볼 위치에 해당하는 계수를 빼주어 구할 수 있다. 도 7을 통해, roll-off가 0.35인 RC 필터에서 $\tau = 7/8$ 일 때의 FTN 간섭 필

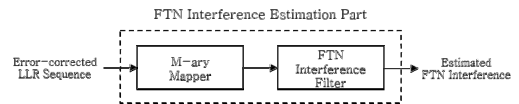


그림 6. FTN 간섭 추정부 구조
Fig. 6. FTN interference estimator structure

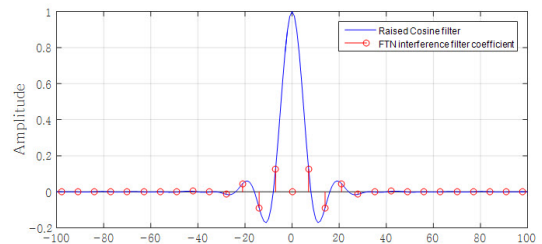


그림 7. RC filter와 $\tau=7/8$ 일 때의 FTN 간섭 필터 계수
Fig. 7. RC filter and the FTN interference filter coefficient where $\tau=7/8$

터 계수를 확인할 수 있다. 이와 같이 추정된 간섭을 수신 FTN 심볼열에서 빼주면, 일부 간섭이 제거된 수신 심볼열을 얻을 수 있고 이를 통해 채널 복호화부의 성능을 개선할 수 있다. 개선된 채널 복호화부 출력을 이용하면 보다 정확한 FTN 간섭 추정이 가능하므로, 이러한 과정을 반복하여 수신 성능을 개선할 수 있는 구조이다. 본 시뮬레이션에서는 전체 반복 횟수를 최대 30회로, 채널 복호화부의 내부 반복 횟수를 1회로 하였으며 반복 과정 도중 에러 비트가 없다면 바로 정보 비트열이 출력되도록 하였다.

그림 8과 9는 각각 부호화 율에 따른 나이퀴스트 및 FTN 기반 시스템의 E_s/N_0 대 BER 성능, S/N 대 BER 성능 시뮬레이션 결과이다. 부호화 율은 1/2, 3/5, 2/3를 고려하였고, FTN 기반 시스템의 경우 $\tau=7/8$ 을 적용하였다. 따라서 FTN 기반 시스템은 동일한 부호화 율을 가지는 나이퀴스트 기반 시스템 대비 약 14%만큼 주파수 이용 효율이 증가한다. 그림 8을 보면, 각 부호화 율에 대해 나이퀴스트 기반 시스템과 FTN 기반 시스템의 성능이 $BER=10^{-5}$ 을 기준으로 약 0.3dB 이내의 E_s/N_0 차이를 보임을 알 수 있다. 즉, FTN 전송 방식을 적용하여 약 14%의 주파수 이용 효율을 이득을 얻으면서, 약 0.3dB 이내의 성능 열화를 가져온 것으로 해석 가능하다. 그러나 본 논문의 II-3에서 해석한 바와 같이, FTN 기반 시스템과 나이퀴스트 기반 시스템간의 성능 비교, 또는 서로 다른 τ 를 가지는 FTN 기반 시스템간의 성능 비교를 할 때, E_s/N_0 는 동일 송신 전력을 나타내는 평가 기준이 아니다. 이 경우, $\tau=7/8$ 이 적용된

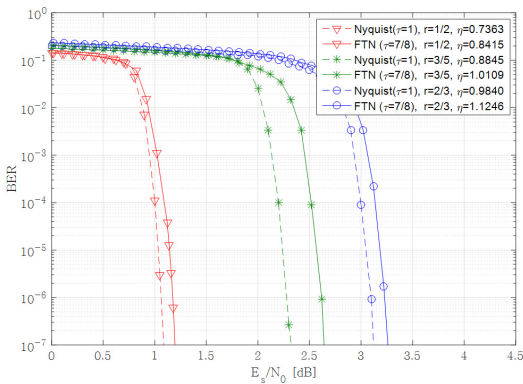


그림 8. 나이퀴스트 및 FTN 기반 시스템 시뮬레이션의 E_s/N_0 대 BER 성능 곡선
 Fig. 8. E_s/N_0 versus BER performance curves of the Nyquist and the FTN-based system

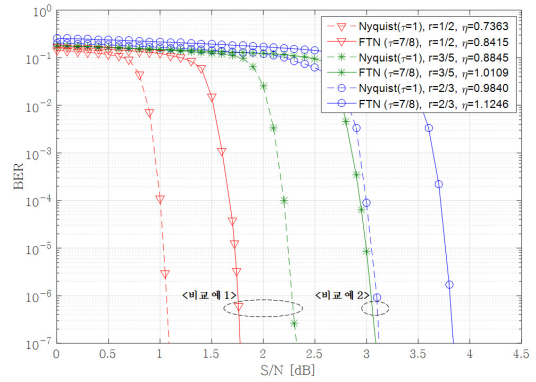


그림 9. 나이퀴스트 및 FTN 기반 시스템 시뮬레이션의 S/N 대 BER 성능 곡선
 Fig. 9. S/N versus BER performance curves of the Nyquist and the FTN-based system

FTN 기반 시스템이 나이퀴스트 기반 시스템에 비해 동일한 E_s/N_0 에서 송신 전력이 $1/\tau=8/7$ 배 높다. 따라서 동일 송신 전력 기준의 성능 평가를 위해서는 식 (4)를 이용하여 S/N 대 BER 성능으로 환산하여야 하며, 이와 같이 환산된 그래프를 그림 9에서 확인할 수 있다. 그림 9를 보면, 나이퀴스트 기반 시스템의 성능 곡선은 그림 8에서의 E_s/N_0 위치와 동일하다. 그러나 FTN 기반 시스템은 S/N 이 E_s/N_0 로부터 $10\log_{10}(1/\tau)$ dB 만큼 이동한 위치에 성능 곡선이 그려지며, 이를 통해 두 시스템의 성능을 비교 분석하는 것이 동일한 송신 전력 기준의 성능 비교라 할 수 있다. 그림 9의 <비교 예 1>과 <비교 예 2>는 S/N 기준 나이퀴스트 기반 시스템과 FTN 기반 시스템의 성능 비교 예이다. 그림 9에서 확인할 수 있는 바와 같이, FTN 기반 시스템이 나이퀴스트 기반 시스템보다 유사한 주파수 이용 효율에서 다소 우수한 수신 성능을 제공하거나, 유사한 수신 성능에서 다소 높은 주파수 이용 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 FTN 기반 시스템의 성능 평가 기준에 대해 논의하였다. FTN 전송 방식을 적용하여 심볼을 중첩시키면, 심볼 당 에너지가 고정되어 있을 때 FTN 인자에 따라 송신 전력이 높아지게 된다. 따라서 FTN 기반 시스템의 성능 평가를 진행할 때 이에 유의하여 평가 기준을 설정할 필요가 있으며, 또한 기존 성능 평가 기준간의 환산 공식 중 일부는 나이퀴스트

전송 방식을 가정하고 있어 FTN 기반 시스템에 적용하는 것이 유효하지 않은 경우가 있음을 확인하였다. 본 논문에서는 이러한 점을 고려하여 FTN 기반 시스템의 타당한 성능 평가 기준 및 확산 공식을 제시하였고, 모의실험을 통해 FTN 기반 시스템과 나이퀴스트 기반 시스템의 S/N 대 BER 성능을 주파수 이용 효율과 수신 성능 관점에서 비교하고 그 결과를 분석하였다.

References

[1] Cisco, *Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2015-2020*, Feb. 2016.

[2] NGMN 5G white paper 1.0, Feb. 2015.

[3] D. Kang, H. Kim, J. Yun, H. Lim, and W. Oh, "Faster than Nyquist transmission with multiple channel codes," *J. KICS*, vol. 41, no. 22, pp. 157-162, Feb. 2016.

[4] M. Irfan, J. Kim, and S. Shin, "Spectral and energy efficient spatially modulated non-orthogonal multiple access (NOMA) for 5G," *J. KICS*, vol. 40, no. 8, pp. 1507-1514, Aug. 2015.

[5] J. Hong, H. Jo, C. Mun, and J. Yook, "Beamforming based CSI reference signal transmission for FDD massive MIMO systems," *J. KICS*, vol. 41, no. 5, pp. 520-530, May 2016.

[6] J. Chung, Y. Han, and J. Lee, "Adaptive channel estimation techniques for FDD massive MIMO systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 7, pp. 1239-1247, Jul. 2015.

[7] J. E. Mazo, "Faster-than-Nyquist signaling," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 54, no. 8, pp. 1451-1462, Oct. 1975.

[8] J. B. Anderson, and V. Öwall, "Faster-than-Nyquist signaling," in *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 8, pp. 1817-1830, Aug. 2013.

[9] M. E. Hefnawy and H. Taoka, "Overview of faster-than-Nyquist for future mobile communication systems," in *Proc. IEEE VTC Spring*, pp. 1-5, Dresden, Germany, Jun. 2013.

[10] A. D. Liveris and C. N. Georghiades, "Exploiting faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 9, pp.

1502.1511, Sept. 2003.

[11] J. Yu, J. Park, F. Rusek, B. Kudryashov, and I. Bocharova, "High order modulation in faster-than-Nyquist signaling communication systems," in *Proc. IEEE VTC Fall*, pp. 1-5, Vancouver, BC, Canada, Sept. 2014.

[12] F. Rusek and J. B. Anderson, "Multistream faster than Nyquist signaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 5, pp. 1329-1340, May 2009.

[13] F. Rusek and J. B. Anderson, "Constrained capacities for faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 2, pp. 764-775, Feb. 2009.

[14] Y. Yoo and J. Cho, "Asymptotic optimality of binary faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 9, pp. 788-790, Sept. 2010.

[15] ETSI EN 302 307 (V1.3.1), *Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)*, DVB, Mar. 2013.

[16] ETSI EN 302 355 (V1.3.1), *Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*, DVB, Apr. 2012.

곽 상 운 (Sangwoon Kwak)



2012년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 공학사
 2014년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학석사
 2014년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 나노미디어전송연구실 연구원

<관심분야> 디지털 방송 시스템, 오류정정부호, 정보이론

윤 정 일 (Joungil Yun)



1996년 2월 : 전북대학교 제어
계측공학과 공학사
1998년 2월 : 광주과학기술원
기전공학과 공학석사
2005년 8월 : 광주과학기술원
기전공학과 공학박사
2005년 7월~현재 : 한국전자통

신연구원 나노미디어전송연구실 선임연구원
<관심분야> 디지털 방송 시스템, 데이터 방송, 방통
융합 멀티미디어 전송

백 명 선 (Myungsun Baek)



2003년 2월 : 세종대학교 정보
통신공학과 공학사
2005년 2월 : 세종대학교 정보
통신공학과 공학석사
2009년 2월 : 세종대학교 정보
통신공학과 공학박사
2009년 4월~현재 : 한국전자통

신연구원 나노미디어전송연구실 선임연구원
<관심분야> 디지털 방송 시스템, 디지털 라디오

임 형 수 (Hyoungsoo Lim)



1992년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 공학사
1994년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 공학석사
1999년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 공학박사
1999년~2000년 : 한국전자통신
연구원

2000년~2001년 : DXO 텔레콤
2002년~현재 : 한국전자통신연구원 나노미디어전송
연구실 실장/책임연구원
<관심분야> 타이밍/주파수 동기화, 디지털 방송 시
스템, 이동통신 시스템, 무선 LAN/MAN/PAN
시스템, OFDM, CDMA