한국항행학회 논문지 제16권 제5호 2012년 10월

TransferJet 시스템의 성능분석

Performance Analysis of a TransferJet System

박경원*, 위정욱*, 서정욱*, 전원기*

Kyung-Won Park*, Jeong-Wook Wee*, Jeong-Wook Seo*, and Won-Gi Jeon*

요 약

본 논문에서는 근접 전기유도 무선통신 시스템의 표준 기술인 TransferJet 시스템의 BER(Bit Error Ratio) 성능이 분석된다. TransferJet 시스템은 타 무선통신 시스템들과 비교해서 짧은 통신 범위(즉, 무선통신환경에서 높은 보안성), 더 적은 다중경로 왜곡, 그리고 높은 전송률을 제공하는 장점이 있다. 수신신호를 복조하기 위하여 TransferJet 수신단의 역확산기와 복조기에 연판정 결합(SC: soft-decision combining) 혹은 경판정 결합(HC: hard- decision combining)이 적용될 수 있다. 확산계수가 4이상인 경우에 SC 방식은 HC에 비하여 최소 2 dB의 SNR 이득을 제공한다. 또한, 모의실험 결과로부터, 3비트 양자화는 이중-정밀 부동소수점과 거의 동일한 성능을 제공하기 때문에 TransferJet 시스템에서 SC 방식에 대한 최적 양자화 비트는 3비트로 결론지을 수 있다.

Abstract

In this paper, BER(Bit Error Ratio) performances of the TransferJet system, which is the standard of a close proximity inductive wireless communication system, are presented and analyzed. Comparing to other wireless communication systems, the TransferJet system has some advantages such as short communication range(i.e., high security in the wireless communication environments), fewer effects of multipath distortion, and higher transmission rate. In order to demodulate the received signal, either SC(Soft-decision Combining) or HC(Hard-decision Combining) can apply to the despreader and demodulator of the receiver. When the spreading factor is more than 4, the SC scheme approximately has a minimum signal-to-noise ratio gain of 2 dB over the HC scheme. Moreover, from simulation results, we can conclude that the quantization bits of 3 bits are an optimum value for the SC scheme in the TransferJet system since the 3-bit quantization achieves nearly the performance as that attained by double-precision floating-point.

Key words : TransferJet, Electric Inductive Wireless Communication,

I. 서 론

최근 스마트 폰 및 패드를 비롯하여 카메라, 캠코더 등 고용량의 멀티미디어 지원 융복합 기기가 급속히 확산되고 있으며, 이에 따라 PC(Personal Computer) 등의 장치와 모바일 기기 간, 혹은 이동 기기 간 대용량 데이터의 공유/이동 필요성이 증대되고 있어 멀티미디어 기기의 효율적인 외부 인터페이스에 대한 요구가 증가하고 있다. 현재 대부분의 WLAN (Wireless Local Area Network) 또는 WPAN

* 전자부품연구원(Korea Electronics Technology Institute)
· 제1저자 (First Author) : 박경원
· 투고일자 : 2012년 9월 24일
· 심사(수정)일자 : 2012년 9월 24일 (수정일자 : 2012년 10월 26일)
· 게재일자 : 2012년 10월 30일

(Wireless Personal Area Network) 광대역 무선통신 기술은 기기간 연결을 위해 일정한 네트워크 접속 절차가 필요하여 사용자가 원하는 순간에 다른 사용자의 단말, 주변의 정보기기 등과 직관적이고 즉각적인 연결이 어려운 문제가 있다. 한편, 손쉬운 연결성을 제공하는 NFC(Near Field Communication) 기술은 수 kbps의 저속의 전송률만을 제공하여 멀티미디어 데이터 전송에는 적합하지 않는 문제가 있다.

이러한 문제의 해결을 위해 소니를 중심으로 초근접 거리에서 광대역 데이터 전송이 가능한 TransferJet 규격을 개발하였으며, 유럽 컴퓨터 제조협회(ECMA)에서는 '11.7월 전기 유도 커플링 방식의 근접 데이터 통신을 위한 CNL(Connection Layer)와 PHY(Physical Layer) 규격을 포함하는 ECMA-398 규격을 발표하였다[1]. TransferJet 기술은 기존 NFC의 접속 편리성과 초고속 기술의 광대역성을 결합한 새로운 형태의 무선통신 기술로 단순한 데이터 교환은 물론이고 사진, 동영상, 이북 등의 다양한 멀티미디어 관련 비즈니스 모델 개발이 가능하여 향후 관련 업체에서의 활발한 채택이 예상된다[2]. 하지만, TransferJet 시스템의 3 dB 대역폭은 560 MHz에 이르기 때문에 하드웨어로 구현되기 위해서는 수신부의 복호 알고리즘이 매우 간단한 구조로 설계되어야 한다[1][3]. 복조부에서 연판정하여 역확산기에서 최종 결합을 취하는 SC(Soft-decision Combining) 방식이 우수한 성능을 제공하나, 하드웨어 구현이 복잡해지는 단점이 있다. 반면에, 복조 시 경판정하여 결합하는 HC(Hard-decision Combining) 방식을 수행하는 것이 하드웨어 측면에서 적합하나 성능이 열화되는 문제가 있다. 따라서, 두 방식의 성능을 분석한 후, 성능과 하드웨어 복잡도 사이에서 최적의 양자화 비트를 선정하는 것이 요구된다.

본 논문의 2장에서는 TransferJet 시스템 개요를 설명하고, 3장에서는 TransferJet 시스템의 송수신 시스템 모델을 제시한다. 4장에서는 SC 방식과 HC 방식을 기반으로 TransferJet 시스템의 성능을 분석한 후, 최적 양자화 비트를 모의실험을 통하여 산출한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

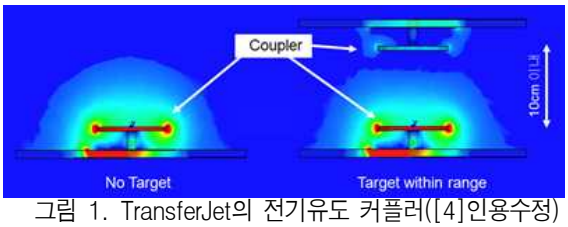


그림 1. TransferJet의 전기유도 커플러([4]인용수정)
Fig. 1. Electric Induction Coupler for TransferJet

Ⅱ. TransferJet 시스템 개요

소니는 최대 560 Mbps의 전송속도를 제공하는 초근접 무선통신 기술인 TransferJet을 발표하였으며, 국제 규격화와 산업 진흥을 위해 파나소닉 등과 함께 TransferJet 컨소시엄을 구성하였다[2]. 그림 1과 같이 TransferJet 기술은 방출되는 신호 중 전력을 방출하는 far-field 신호를 억제하고, 전력을 저장하는 near-field를 강화하도록안테나를 특수 제작함으로써 이를 내장한 두 기기가 수 cm 이내의 초근접 거리 내에 근접할 경우에만 전계가 유도되도록 하여 기기 간 접속이 이루어지는 방식이다[4]. 이와 같은 구조 때문에 방사된 신호의 반사나 산란에 의하여 발생되는 다중경로가 없는 특징이 있어서 수신기의 구조를

표 1. TransferJet 시스템의 물리계층 파리미터
Table 1. Physical layer parameters of the TransferJet system

항목	파라미터
주파수 대역	4.48 GHz
칩레이트	560 Mcps
전송률	17, 32, 65, 130, 261, 522 Mbps
심볼레이트	280 Msps
변조방식	Pi/2-shift BPSK+DSSS(1-16)
오류정정 부호	RS(240,224)+CC R=1/2
통신 거리	≤ 5-10cm
송신 전력	≤ -70dBm/MHz
네트워크 유형	P2P(Peer-to-Peer)

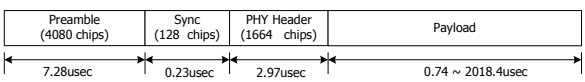


그림 2. PPDU 프레임 형식
Fig. 2. PPDU frame format

단순화 시킬수 있는 장점이 있다. 접속이 이루어

진 이후에는 4.48 GHz 대역의 560 MHz의 대역폭에서 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)기반으로 단일 반송파 방식인 Pi/2 shift-BPSK(Binary Phase Shift Keying)로 변조된 심볼을 -70dBm/MHz의 전력으로 전송한다. TransferJet 시스템의 물리계층 사양은 표 1과 같다. 모든 전송률에 대해 변조방식은 BPSK로 동일하기 때문에 시스템의 전송률은 확산계수(spreading factor)에 의하여 결정되며, 현 규격에서 최대 유효 전송률은 522 Mbps이다. FEC(Forward Error Correction) 부호화 방식은 단축 RS 부호(shortened Reed-Solomon code)인 RS(240, 224, t=8)와 구속장 길이가 K=3이고 부호률이 R=1/2인 CC(Convolutional Code)를 연집하여 구성된다. 가장 높은 522 Mbps 전송률의 경우에 CC를 사용하지 않고 RS 부호만 사용한다. 통상적으로 CC 단독부호 보다 RS-CC 연집부호가 보다 우수한 오류정정성능을 제공한다[5].

그림 2는 TransferJet 시스템의 PPDU(Physical layer Protocol Data Unit) 구성 형식을 보여준다. 4080 칩으로 구성된 프리앰블은 패이로드(payload)와 달리 BPSK로 변조되지 않고 전송되며, 패킷동기화를 위하여 사용되는 Sync 필드는 BPSK로 변조된다. 패이로드를 복호하는데 필요한 전송률 모드 및 패이로드의 길이에 대한 정보는 가장 강인한 모드로 부호화되는 PHY Header 필드에 전송된다. 패이로드는 최소 0.76 usec에서 최대 2018.4 usec로 구성된다. PHY Header 필드는 확산계수(spreading factor)가 16이고 전송률이 가장 낮은, 즉 부호화율이 가장 높은 17 Mbps 모드로 전송된다. 또한 패이로드 부분은 채널환경에 의존하여 1-8로 가변되는 확산계수에 따라 32 - 522 Mbps의 전송률로 송신된다.

III. TransferJet 시스템 모델

3-1 시스템 모델

TransferJet 시스템의 간략화된 블록도는 그림 3과 같다. 그림 3에서 하나의 전송 패킷에 대한 전송 칩(transmit chips)의 수가 N_{cps}인 경우에, RS 부호화와 CC 부호화를 걸쳐 확산기를 통과한 l번째 전송 비트 $s[l]$은 다음과 같이 표현된다.

$$x[G_{sf} \cdot l + m] = g_m s[l], \quad l = 0,1,\cdots,N_{cps}/G_{sf} - 1 \tag{1}$$

여기서 G_{sf}와 g_m은 각각 확산계수와 확산벡터의 m번째 원소를 나타낸다. 전송률에 따라 G_{sf}는 1, 2, 4, 8, 16 중 하나의 값으로 설정된다. G_{sf}가 16인 경우는 그림 2의 PHY(PHYsical layer) Header 부분에만 적용되고 패이로드 부분은 8까지만 적용된다. 확산된 비트열은 다음과 같은 수식을 통하여 Pi/2 shift-BPSK 변조의 복소 심볼로 변환된다.

$$v[4n+k] = W[k\%4] \cdot (2x[4n+k]-1), \quad n = 0,1,\cdots,N_{cps}/4-1;\ k = 0,1,2,3 \tag{2}$$

여기서 '%' 는 modulo 연산을 나타내며, 변조 심볼의 위상을 결정하는 가중치 $W[k]$는 비트 인덱스 k에 따라 $W[k] = j^k$로 정의된다. 그림 4와 같은 기저대역 전송 파형을 생성하기 위한 펄스-형성 필터(Pulse-shaping Filter) $S_{BW}(t)$를 통과 후, TransferJet 시스템의 기저대역 최종 출력 신호는 다음과 같이 표현된다.

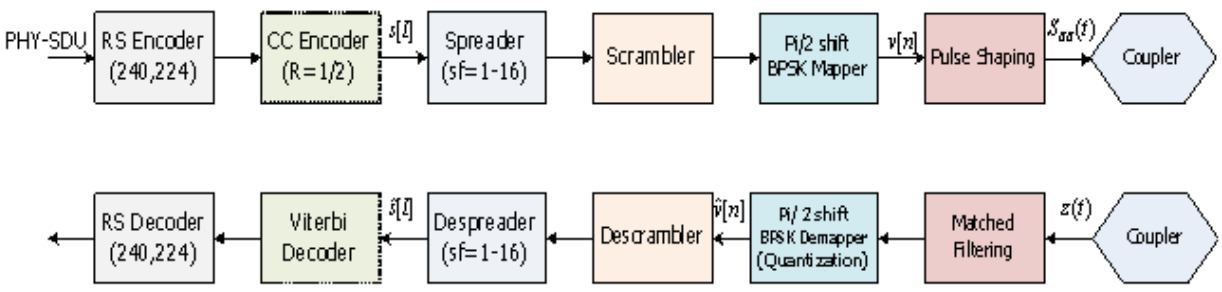


그림 3. TransferJet 시스템의 간략 블럭도
Fig. 3. A simplified block diagram of the TransferJet system

$$S_{BB}(t) = S_{BW}(t) \otimes \sum_{n=0}^{N_{\chi ps}-1} v[n]\delta(t - nT_c) \quad (3)$$

여기서 $\delta(t)$, T_c, $\otimes$는 각각 델타함수(delta function), 칩 지속시간, 컨벌루션(convolution)을 나타낸다.

TransferJet 시스템의 커플러 기반 통신 환경상 다중경로 페이딩이 존재하지 않기 때문에 본 논문에서는 채널환경을 가산성 백색잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise) 채널로 가정한다[4]. 이러한 경우에 수신단에 수신된 신호는 연속시간 영역에서 다음과 같이 표현된다.

$$z(t) = S_{BB}(t) + n(t) \quad (4)$$

여기서 $n(t)$는 평균이 0이고 분산이 σ_n^2인 AWGN을 나타낸다. 식(4)에서 SNR(Signal-to-Noise Ratio) $\rho = E[|S_{BB}(t)|^2]/E[|n(t)|^2] = E[|S_{BW}(t)|^2]/\sigma_n^2$로 표현된다. 여기서 $E[\cdot]$은 기대치를 나타낸다. 커플러를 통하여 수신된 신호가 연속시간 영역에서 정합필터(matched filter), $h_m(t) = S_{BW}(-t)$를 통과한 후 T_c 간격으로 샘플링된 경우에, 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r[n] = S_{BW}(-t) \otimes z(t)|_{t=nT_c} \quad (5)$$

역확산 과정에서 백색잡음 및 간섭을 제거하기위해서 Pi/2 shift-BPSK의 복조과정에서 연판정(soft-decision)이 적용된 경우에, 복조된 각 소프트 비트 정보는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{v}[4n+k] = W^*[k\%4] \cdot r[4n+k], \quad n = 0,1,\cdots,N_{\chi ps}/4-1;\ k = 0,1,2,3 \quad (6)$$

여기서 윗첨자 '*'는 공액 복소수를 의미한다. 역확산과정에서 SC 방식을 적용하면 다음과 같다[6].

$$z[l] = \sum_{m=0}^{G_{sf}-1} g_m \hat{v}[G_{sf} \cdot l + m] \quad (7)$$

최종적으로 다음과 같이 경판정된 이진 복호 비트는 RS-CC 연접 복호기의 입력비트로 이용된다.

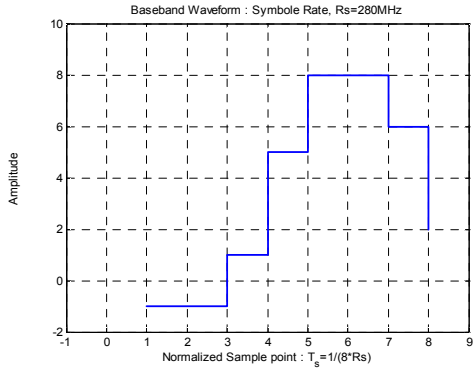


그림 4. 기저대역 전송파형
Fig. 4. Baseband transmit waveform

$$\hat{s}[l] = \begin{cases} 1, & \text{if } z[l] \geq 0, \\ 0, & else \end{cases} \quad (8)$$

반면에 HC 방식은 식 (6)의 복조과정에서 다음과 같이 미리 경판정된 비트 정보를 식 (7)에서 직접 이용한다.

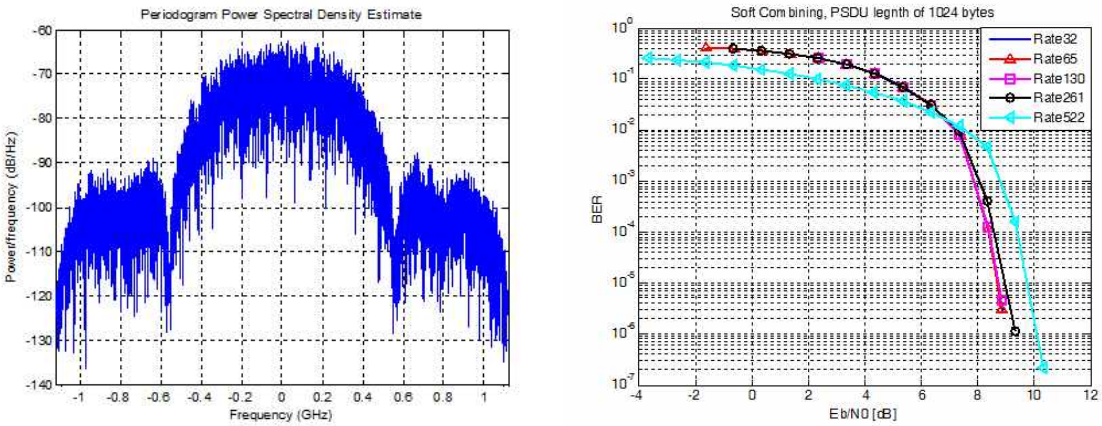
$$\hat{v}_H[l] = \begin{cases} 1, & \text{if } \hat{v}[l] \geq 0, \\ -1, & else \end{cases} \quad (9)$$

따라서 HC 방식은 역확산기의 결합과정에서 이진 비트로 연산되며, 또한 디인터리버 및 역스크램블러에서도 이진 비트로 처리되기 때문에 하드웨어 연산량 및 메모리 측정면에서 유리한 장점이 있다.

3-2 양자화

TransferJet 시스템은 높은 전송률을 제공하기 위하여 고속의 클럭속도에서 동작한다. 앞서 설명한 바와 같이, Pi/2 shift-BPSK 복조과정에서 경판정을 수행하는 HC는 이후단의 데이터 패스를 1비트 수준으로 줄일 수 있기 때문에 SC보다 TransferJet 시스템에 적합하지만 성능이 열화되는 문제가 있다. 따라서 복조 비트 정보를 양자화(quantization)하여 전체 시스템의 복잡도를 줄일 수 있는 연판정하는 방식이 요구된다. 식 (6)의 정합필터의 출력을 b로 양자화 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{v}_b[n] = Q_b(\hat{v}[n]), \quad n = 0,1,\cdots,N_{\chi ps}-1 \quad (10)$$



(a) 송신신호 스펙트럼 (b) 전송모드에 따른 비트오류율

그림 5. 송신신호 스펙트럼 및 각 전송모드에 대한 비트오류율 성능
Fig. 5. The power spectral density of the transmitted signal and BER performance for each data rate mode

여기서 함수 $Q_b(x)$는 2^b의 레벨을 지닌 양자화 함수로 $Q_b(x)$의 출력은 집합 $\mathbb{S}_b = \{-2^b+2u+1 \mid u=0,1,\cdots,2^{b-1}-1\}$의 원소이다. 식 (10)에서 b=1인 경우, $\hat{v}_{b=1}[n] = \hat{v}_H[n]$로 식 (9)의 HC와 동일한 결과를 보인다.

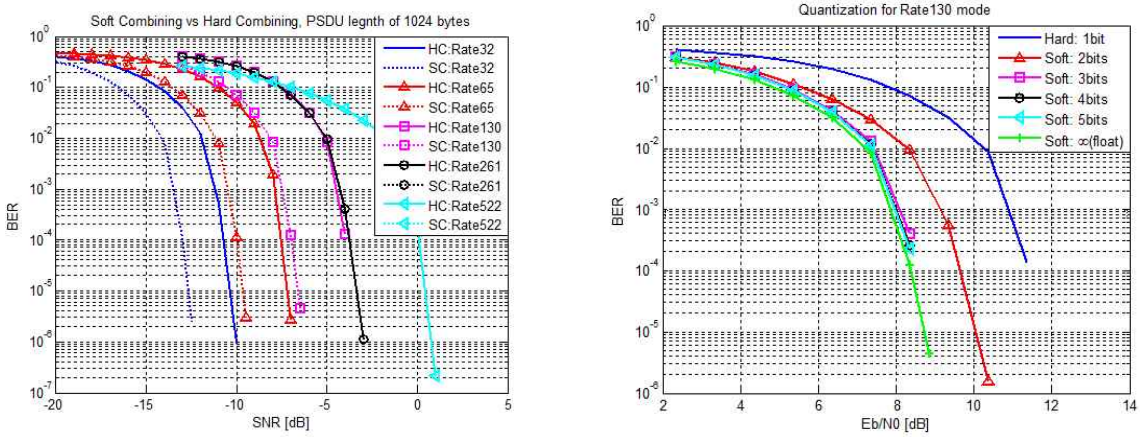
양자화 비트 b에 따라 하드웨어 복잡도와 성능사이에는 trade-off가 존재하기 때문에 최적의 양자화 비트를 선정하는 것이 중요하다.

Ⅳ. 모의실험

본 장에서는 AWGN 채널환경 하에서 TransferJet 시스템의 BER 성능을 분석하고, 최적 양자화 비트를 모의실험을 통하여 산출한다. 모의실험에 사용된 물리계층 파리미터는 표 1에 제시된 물리계층 파리미터와 동일하며, 모의실험을 위한 송.수신 블럭도는 그림 3의 블록도과 같다.

모의실험에서는 PPDU 구성요소 중 패리로드에 대한 물리계층 비트오류율 성능분석을 위해서 확산계수는 전송률에 따라 1 - 8이 사용되었다. 안테나 대신에 커플러를 사용하는 TransferJet 기술의 전송특성상 다중경로 페이딩에 의한 왜곡이 발생하지 않기 때문에 본 논문의 모의실험에서 채널 모델은 AWGN 채널을 가정한다. 또한 수신부에서 수신신호는 정합필터로 수신되며, 이상적인 시간 및 주파수 동기화를 가정한다. 송신단에서는 기본 심볼 전송률R_s=280 Msps의 8배로 오버샘플링된 신호를 펄스-성형 필터를 통과시켜 송신파형을 생성하여 커플러를 통하여 전송한다. 따라서, 펄스-성형 필터 출력의 샘플링 주파수는 2.24 GHz가 된다.

그림 5는 송신신호의 스펙트럼 및 각 전송모드의 BER(Bit Error Ratio) 성능을 보여준다. 그림 5(a)는 펄스-성형 필터를 통과한 후, 전송신호의 스펙트럼으로 그림에서 확인할 수 있듯이, 전송신호의 3 dB 대역폭은 560 MHz이며, 피크 대비 사이드로브는 약 30 dB로 규격에서 요구하는 대역외 방사특성을 만족함을 확인할 수 있다[1]. 그림 5(b)는 1024바이트의 PSDU(Physical Service Data Unit) 패킷이 전송되며 수신단에서 SC 방식이 적용된 경우에 RS 복호기와 Viterbi 복호기를 통한 오류정정 성능을 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이, Eb/N0 측면에서 확산계수에 상관없이 동일한 성능을 보이며, 특히 RS 부호기를 사용하지 않고 CC만을 사용하는 522 Mbps 모드의 경우에 약 9.2 dB의 Eb/N0에서 BER=10-4를 만족함을 확인할 수 있다. 하지만, 확산계수가 2배 만큼 증가할수록, 즉 전송률이 절반으로 감소할수록 SNR



(a) Soft-Combining과 Hard-Combining 비교 (b) 양자화 비트 영향

그림 6. TransferJet 시스템에서 양자화 비트의 영향
Fig. 6. Effects of the quantization bits on the TransferJet system

측면에서 약 3 dB의 성능 개선이 발생한다.

그림 6은 TransferJet 시스템에서 양자화 비트의 영향을 보여준다. 그림 6(a)는 SC 방식과 HC 방식의 BER 성능을 비교한 것이다. 확산계수가 1인 Rate522와 Rate261의 BER 성능은 HC 혹은 SC 방식에 상관없이 동일한 성능을 보인다. 따라서 확산계수가 1인 경우에는 HC 와 SC 사이에 성능차가 발생하지 않는다. 하지만, 확산계수가 2인 Rate130의 경우에 HC 방식으로 검출하게 되면, 확산계수가 1인 Rate261의 HC 및 SC 방식과 동일한 성능을 가져 확산의 효과가 없어지는 문제가 발생한다. 확산계수가 4이상의 경우에 SC 방식은 HC 방식보다 약 2 dB 우수한 성능을 보인다. 그림 6(b)는 그림 6(a)에서 확인할 수 있듯이, 양자화 비트에 가장 민감한 확산계수가 2인 Rate130 모드에 대한 양자화 비트수에 따른 BER 성능의 영향을 도시한 것이다. 그림으로부터, Rate130 모드의 경우에 부동소수점을 사용하는 SC 방식과 1비트 정보를 사용하는 HC 방식간의 성능차이는 약 3 dB 정도이며, 양자화 비트가 3비트 이상인 경우에 성능에 거의 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다. TransferJet 시스템은 고속의 처리속도를 요하기 때문에 성능 열화를 최소화하면서 하드웨어 복잡도를 낮춰야한다. 모의실험 결과로부터, 양자화 비트가 3비트인 경우에 부동소수점 해상도를 사용하는 경우와 비교하여 거의 동일한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

그림 7은 HC 방식이 적용된 TransferJet 시스템의 BER 성능에 대한 FEC 부호의 효과를 보여준다. 부호화가 적용되지 않은 BPSK/QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)의 BER 성능과 비교할 경우에 RS 부호는 Eb/N0 10 dB 이상에서 부호화의 효과가 발생하며 RS-CC 연집부호는 약 8.7 dB 이상의 Eb/N0에서 오류정정 효과가 발생한다. 결과적으로 RS 부호에 R=1/2의 CC가 추가되면, 약 1 dB의 Eb/N0 성능개선 효과가 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 전자기유도 기반의 초근접 무선통신 기술인 TransferJet의 비트오류율 성능을 모의실험을 통하여 분석하였다. 펄스-성형 필터를 통하여 560 MHz의 3 dB 대역폭을 만족시킬 수 있고, RS 부호기를 사용하지 않고 CC만을 사용하는 522 Mbps 모드의 경우에 약 9.2 dB의 Eb/N0에서 BER=10-4를 만족함을 확인하였다. HC 방식의 경우에 확산계수가 감소할수록 SC 방식과 성능차가 커지며, 확산계수가 1인 Rate130의 경우에 성능열화가 가장 심하게 발생한다. 하지만, TransferJet 시스템은 고속의 연산을 요하

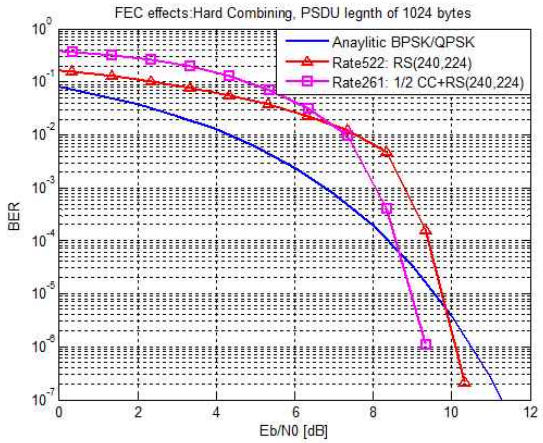


그림 7. HC이 적용된 Transferjet 시스템의 BER 성능에 대한 FEC 효과

Fig. 7. Effects of FEC on BER performances of the TransferJet system in which the HC scheme is applied

기 때문에 성능은 유지하면서 연산량을 줄일 수 있도록 SC 방식의 데이터 패스 해상도를 최소화 시킬 필요가 있다. 모의실험 결과, RS+CC 연접 부호가 적용된 경우에 양자화 비트가 3비트 이상이면 부동소수점 연산을 사용하는 SC 방식에 근접한 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한, RS 부호만 적용된 Rate522는 Eb/N0 10 dB 이상인 환경에서 RS 부호의 효과가 발생하며, RS+CC의 연접부호는 RS 단독 부호에 비하여 약 Eb/N0 1 dB 정도의 성능 향상이 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Standard ECMA-398, Close Proximity Electric Induction Wireless Communications, *ECMA International,* Jun., 2011.

[2] http://www.transferjet.org

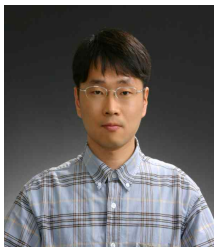
[3] System Specifications for Physical Layer and Connection Layer, *TransferJet Consortium,* may, 2009.

[4] TransferJet Overview Whitepaper, *TransferJet Consortium,* TJC_004, spring, 2009

[5] S. Lin and D. Costello, Error Control Coding Fundamentals and Applications, 2nd ed., Prentice-Hall Inc, *Upper Saddle River,* NJ, 2004.

[6] J. G. Proakis, Digital Communications, 4th ed., New York: *MacGraw-Hill,* 2001.

박 경 원(朴京元)



1999년 2월 : 중앙대학교 전기공학과 공학사
2001년 2월 : 중앙대학교 전기공학과 공학석사
2005년 2월 : 중앙대학교 전기전자공학부 공학박사
2005년 1월 ~ 현재: 전자부품연구원 선임연구원
관심분야: 디지털 통신, OFDM 셀룰러/LAN 모뎀, 디지털 방송 및 통신융합 시스템

위 정 욱(魏政煜)

1999년 2월 : 중앙대학교 전기공학과 공학사
2001년 2월 : 중앙대학교 전기공학과 공학석사
2011년 8월 : 중앙대학교 전기전자공학부 공학박사
2001년 2월 ~ 현재: 전자부품연구원 선임연구원
관심분야: 디지털 방송 시스템, 무선통신 시스템

서 정 욱(徐廷郁)

1999년 2월 : 한국항공대학교 통신정보공학과 공학사
2001년 2월 : 한국항공대학교 통신정보공학과 공학석사
2007년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과 박사수료
2001년 2월 ~ 현재: 전자부품연구원 선임연구원
관심분야: 디지털 통신 시스템, 디지털 방송 시스템

전 원 기(全元奇)

1994년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 공학사
1996년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 공학석사
1999년 8월 : 중앙대학교 전자공학과 공학박사
2001년 7월 : 중앙대학교 전자전기공학부 BK21 계약교수
2001년 8월 ~ 현재: 전자부품연구원 책임연구원
관심분야: OFDM 기반의 무선통신 시스템, 디지털 방송 및 통신융합 시스템