비정형 통신 채널 환경에서 비행형 에어노드의 대역 효율적인 통신을 위한 연접 다이버시티 시스템

Concatenated Diversity System for Bandwidth Efficient Communication of Flight Type Air Node in Unstable Channel Environments

강철규*, 박진희*, 오창헌**

Chul-Gyu Kang*, Jin-Hee Park*, and Chang-Heon Oh**

요 약

본 논문에서는 비정형 궤도를 따라 이동하며 통신하는 비행체들 간의 데이터 전송 신뢰성을 보장하기 위해 다이버시티 TCM(trellis coded modulation) 코드를 연접한 연접 다이버시티 시스템을 제안하고 그 성능을 분석한 후 제안한 시스템을 설계하였다. 제안한 시스템은 다이버시티 TCM 코드를 연접하였기 때문에 부호화 이득 및 대역 활용의 효율성이 높을 뿐만 아니라 데이터 전송 신뢰성 또한 높다. 이러한 특성은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있는데 제안한 시스템의 비트 오율 성능(BER)을 시뮬레이션 하여 TCM 코드와 비교해 본 결과 BER 10^{-2}에서 약 11dB 우수 하고 최대 다이버시티 이득을 갖는 시공간 블록코드와 비교한 결과 BER 10^{-3}에서 약 10dB 우수하다. 또한 다이버시티 이득과 코딩 이득을 갖는 시공간 트렐리스 코드와 비교하였을 경우에는 최대 약 1.5dB 우수함을 확인할 수 있다. 마지막으로 제안한 시스템을 HDL(hardware description language)로 구현하여 그 동작을 확인해 본 결과 그 동작의 결과가 적합함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a concatenated diversity system to assure the data transmission reliability between flight type air nodes which move according to their atypical orbit, then its performance is analyzed using computer simulation and it is designed with hdl. The proposed system cannot only improve a bandwidth efficient and coding gain from diversity TCM code but also the reliability of data transmission is high. From the computer simulation result about bit error rate(BER) of the proposed system, we confirm that its BER performance is about 11dB greater than TCM code at 10^{-2} and about 11dB greater than space time block code at 10^{-3} which has a full diversity gain. In addition, when we compare its BER performance with space time trellis code which has both a diversity gain and a coding gain, the performance of the proposed system is greater than about 1.5dB at 10^{-5}. Lastly, after designing the proposed system with HDL, we can confirm that the operation result is correct.

Key words : Diversity System, MIMO, Air Node Communication, Concatenated Coding, Diversity TCM

I. 서 론

최근 발전된 IT 기술을 바탕으로 주변의 모든 곳에 센서를 부착하여 사물의 인식정보는 물론 주변의

* 한국전자부품연구원(RFID/USN Convergence Research Center, Korea Electronics Technology Institute)
** 한국기술교육대학교(Korea University of Technology and Education)
· 제1저자 (First Author) : 강철규
· 투고일자 : 2012년 3월 12일
· 심사(수정)일자 : 2012년 3월 12일 (수정일자 : 2012년 4월 23일)
· 게재일자 : 2012년 4월 30일

환경정보까지 탐지할 수 있으며, 실시간으로 네트워크에 연결하여 정보를 획득 또는 관리할 수 있는 USN(ubiquitous sensor network)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 대부분의 연구가 정적 센서 네트워크와 저속의 데이터 전송 속도를 기반으로 하는 홈 오토메이션, 가전제어, 전등제어, 홈 보안등으로 국한되는 실정이다. 이러한 정적, 저속의 네트워크는 1986년 발생한 체르노빌 원전사태, 2011년 3월 9.0의 대지진으로 인해 발생한 후쿠시마 원전사태와 같은 큰 재난재해 시 빠르게 대처하기가 어렵다[1]-[3].

이러한 문제를 해결하기 위해 군집 비행형 에어노드 기반의 동적 센서 네트워크 기술이 필요하다[4]. 동적 센서 네트워크에서의 통신 환경은 비행형 노드들이 특정 패턴으로 이동하며 노드들 간 통신하기 때문에 정적으로 고정되어 있는 노드들 간의 통신 환경보다 훨씬 열악하다. 특히 동영상 신호나 음성신호 같은 신호들은 비행체들의 이동으로 발생하게 되는 채널간의 간섭, 전송 손실, 다중경로 페이딩 같은 물리적인 특성에 민감하기 때문에 이를 안정적으로 전송하기 위해서는 물리적인 특성에 강한 무선 통신 시스템을 구현하는 것이 필수적이다. 이에 다수의 송수신 안테나를 이용한 MIMO(multiple input multiple output) 기술인 다이버시티 TCM과 시공간 블록 코드(STBC; space time block code)가 주목받고 있다.

그러나 다이버시티 TCM 코드의 성능은 다중경로 페이딩 채널의 시간지연 확산에 의해 감쇄되고, 등화기와 같은 ISI를 제거하는 구조가 필요하며, 시공간 블록 코드는 채널코딩을 하지 않기 때문에 부호화 이득이 없다[5]. 또한, 지금까지의 MIMO 시스템에 대한 연구를 보면 대부분 송수신기 사이의 채널이 완전 독립한다고 가정한다. 하지만 실제 환경에서는 다중경로 성분 때문에 각 각의 채널은 매우 심한 산란 채널을 형성한다. 따라서 상호 연관된 신호에 의하여 신호 경로 사이가 상관을 이루면서 채널 용량은 상당히 감소하게 된다[6],[7].

따라서 본 논문에서는 무선 통신 환경에서 보다 신뢰성 있는 정보 전송을 위해 STBC와 다이버시티 TCM의 장점인 다이버시티 이득, 채널 효율성[8], 코딩 이득을 동시에 갖는 연접 다이버시티 시스템을 제안한다.

Ⅱ. 연접 다이버시티 시스템 구조

그림 1은 연접 다이버시티 시스템의 블록 다이어그램이다. 그림 1에서 보는 것과 같이 인터리버를 거친 데이터 비트들은 다이버시티 TCM 부호화기에 의해 변조된 후 시공간 블록 코드의 부호화기로 보내진다. 시공간 블록 코드의 부호화기 에서는 다이버시티 TCM 부호화기로부터 입력된 2개의 심볼 $x_0,\ x_1$를 $x_0,\ x_1, -x_1^*,\ x_0^*$과 같이 부호화하고 시간 $t = t_0$에서 x_0를 1번째 송신 안테나를 통해 x_1를 2번째 송신 안테나를 통해 동시에 전송한다[9]-[11].

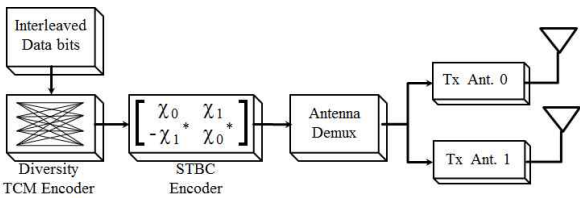

그림 1. 연접 다이버시티 시스템의 블록도
Fig. 1. Block diagram of concatenated diversity system.

다음 두 심볼 $-x_1^*,\ x_0^*$은 심볼 주기 T_s만큼 지연된 시간 $t = t_0 + T_s$ 에서 1, 2번 안테나를 통해 각각 전송된다. 각 안테나를 통해 전송된 신호는 두 심볼 주기 $2T_s$동안 변하지 않고(quasi-static), 인접 심볼간 간섭이 없는(flat) 채널 $h_{i,j}$을 거친다고 가정하면 심볼 주기 T_s간격을 두고 수신된 신호 r_0, r_1, r_2, r_3는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_0 &= \ \ h_{11}x_0 + h_{21}x_1 + n_0, \\ r_1 &= -h_{11}x_1^* + h_{21}x_0^* + n_1, \\ r_2 &= \ \ h_{12}x_0 + h_{22}x_1 + n_2, \\ r_3 &= -h_{12}x_1^* + h_{22}s_0^* + n_3. \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 n_0와 n_1은 평균이 0이고 분산이 σ_n^2인 복소 가우시안 랜덤 변수이다. 시공간 블록 코드의 최대 다이버시티 이득을 얻기 위해 식(1)과 같이 수신

된 신호에 MRC (maximum ratio combining) 기법을 적용하여 전송한 두 심볼을 추정한 결과는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned}\widetilde{x_0} &= h_{11}^* r_0 + h_{12} r_1^* + h_{21}^* r_2 + h_{22} r_{22}^*, \\ \widetilde{x_1} &= h_{12}^* r_0 - h_{11} r_1^* + h_{22}^* r_2 - h_{21} r_{22}^*.\end{aligned} \quad (2)$$

이 결과는 소프트 디시젼 비터비 복호화기로 보내지고, 비터비 복호화기 에서는 식 (3)과 같은 방법으로 가지 값을 계산한다.

$$\begin{aligned}&m(\widetilde{x_0}, x_i) \\ &= \left(\sum_{i=1}^{M_T}\sum_{j=1}^{M_R}|h_{ij}|^2 - 1\right)|x_i|^2 + d^2(\widetilde{x_0}, x_i) \\ &+ \left(\sum_{i=1}^{M_T}\sum_{j=1}^{M_R}|h_{ij}|^2 - 1\right)|x_i|^2 + d^2(\widetilde{x_1}, x_i).\end{aligned} \quad (3)$$

$m(\widetilde{x_a},\ x_b)$는 신호 $\widetilde{x_a}$와 x_b의 유클리디안 거리 값으로 식 (4)와 같다.

$$m(\widetilde{x_1},\ x_i) = (\widetilde{x_1} - x_i)(\widetilde{x_1} - x_i)^*. \quad (4)$$

Ⅲ. 연접 다이버시티 시스템 설계

3-1 다이버시티 트렐리스 코드 부호화기 설계

그림 2는 제안한 시스템의 다이버시티 트렐리스 코드의 부호화기 블록 다이어그램이다. 입력된 데이터 비트열은 직병렬 변조기에 의해 d_t^1, d_t^2로 병렬화되고 d_t^1은 상단의 부호화 블록으로 d_t^2는 하단의 부호화 블록으로 전달된다. 이렇게 입력된 비트들은 표 1의 code type에 의해 정의된 생성행렬 값 $g_{l,m}^v$들과 곱해진다. 여기에서 $m = 1, 2$ 는 다이버시티 TCM 부호화기의 상단 블록($m = 1$)과 하단 블록($m = 2$)을 의미하고 $l = 1, 2$은 m블록으로 입력된 입력 순서이며, $v = 1, 2$는 m블록 내의 상단 블록($l = 1$)과 하단 블록($l = 2$)을 의미한다.

표 1. 4-state 다이버시티 트렐리스 코드의 생성행렬
Table 1. Generation matrix of 4-state diversity trellis code

Code Type	$g_{01}^1, g_{0,2}^1$	$g_{1,1}^1, g_{1,2}^1$	$g_{01}^2, g_{0,2}^2$	$g_{1,1}^2, g_{1,2}^2$
0	(0, 2)	(2, 0)	(0, 1)	(1, 0)
1	(2, 2)	(1, 0)	(0, 2)	(3, 1)
2	(0, 2)	(1, 2)	(2, 3)	(2, 0)

생성행렬 값과 곱해져 부호화된 두 신호 x^1과 x^2는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

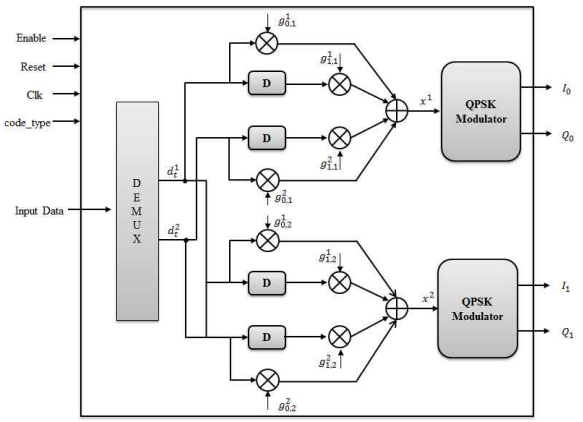

그림 2. 다이버시티 트렐리스 코드 부호화기
Fig. 2. Diversity trellis code encoder.

$$\begin{aligned}x^1 &= d_t^1 g_{1,1}^1 + d_t^2 g_{1,1}^2 + d_{t+1}^1 g_{0,1}^1 + d_{t+1}^2 g_{0,1}^2 \\ x^2 &= d_t^1 g_{1,2}^1 + d_t^2 g_{1,2}^2 + d_{t+1}^1 g_{0,2}^1 + d_{t+1}^2 g_{0,2}^2\end{aligned} \quad (5)$$

위의 코드와 같이 부호화된 두 신호 x^1과 x^2는 QPSK로 변조되기 위해 QPSK 변조 블록으로 전송된다. 만약 시공간 트렐리스 코드의 부호화기에서 출력된 x^1의 값이 0이면 QPSK 변조기에서 출력되는 허수(I-축) 값은 '0'이 출력되며, 실수(Q-축) 값은 '0'이 출력된다. 동일한 방법으로 QPSK 변조기로 3이 입력되면 허수(I-축) 값은 '0'이 출력되며, 실수(Q-축)의 값은 '1'이 출력된다.

3-2 시공간 블록 코드의 부호화기 설계

표 2는 2개의 안테나를 활용하는 시공간 블록 코드의 부호화 테이블이다.

표 2. 2개의 안테나를 활용하는 STBC 부호화 테이블
Table 2. Space time block code encoding table with 2 transmit antenna.

	Antenna 0	Antenna 1
time t	x_0	x_1
time $t+T$	$-x_1^*$	x_0^*

시간 t에서 안테나 0과 1을 통해 x_0과 x_1이 전송되고 시간 $t+T$에서 안테나 0과 1을 통해 $-x_1^*$과 x_0^*이 전송된다. (*)는 신호 x의 켤레 복소수(conjugation)이다. 그림 3은 표 2에서 설명한 시공간 블록코드의 부호화기의 블록 다이어그램이다. 켤레 복소수는 실수의 부호는 변하지 않고 허수의 부호만 토글 시키는 특징을 갖는다. 이러한 특징을 이용하여 시공간 블록 코드의 부호화기를 설계한다.

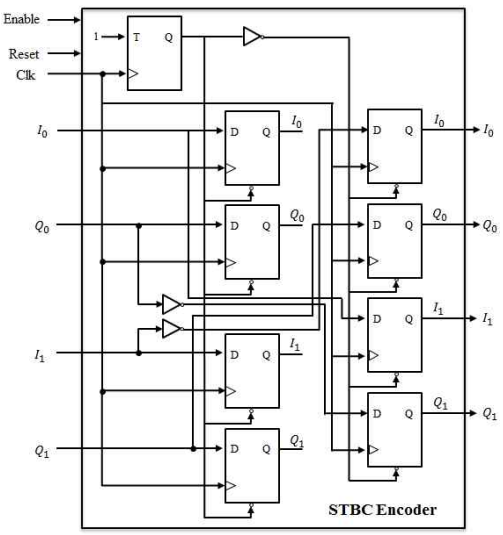

그림 3. STBC 부호화기의 블록도
Fig. 3. A block diagram of STBC encoder.

시공간 블록 코드의 출력 신호 코드 듀레이션은 $T_{tcm}=2T_{STBC}$와 같아야 한다. 따라서 enable 신호가 set되면 클록 신호는 T-플립플롭(flip-flop)으로 입력되고 이 플립플롭의 출력은 두 개의 시공간 블록 코드의 출력 신호를 선택하는 역할을 한다. T-플립플롭의 출력 Q가 high일 경우에 첫 번째 열에 있는 D-플립플롭만 활성화 되어 신호 x_0, x_1이 출력되고 출력신호 Q가 low일 경우에는 두 번째 열에 있는 D-플립플롭만 활성화되어 시공간 블록 코드의 직교 변조 신호 $-x_1^*$, x_0^*가 출력된다. 두 번째 출력 신호는 첫 번째 신호의 음수 부호가 붙은 켤레 복소수 신호와 첫 번째 신호의 켤레 복소수 신호이므로 첫 번째 안테나의 출력 $I_0=-I_1$, $Q_0=Q_1$이고 두 번째 안테나의 출력 $I_1=I_0$, $Q_1=-Q_0$ 이다.

3-3 연접 다이버시티 시스템의 복조기

그림 4는 연접 다이버시티 시스템의 수신부 블록 다이어그램이다. Enable 신호와 함께 들어온 신호 ant0_i, ant0_q, ant1_i, ant1_q, ch0_i, ch0_q, ch1_i, ch1_q 신호는 가지 값을 계산하기 위한 예비 연산 블록인 estimate 블록을 거쳐 송신단에서 전송한 두 심볼 x_0와 x_1을 식(2)와 같은 연산을 통해 추정한다.

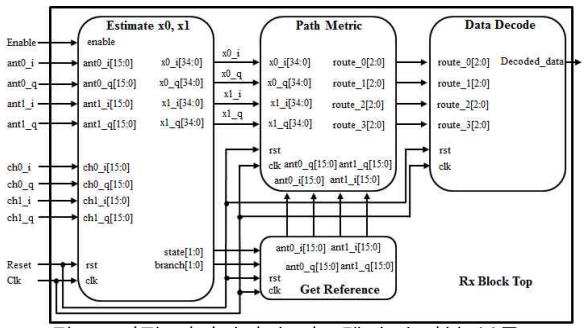

그림 4. 연접 다이버시티 시스템의 수신부 블록도
Fig. 4. A block diagram of concatenated diversity system

이렇게 추정한 신호들은 path metric 블록으로 보내지고 path metric 블록에서는 reference 블록에서 전송된 각 가지에서의 참조 값과 estimation 블록에서 전송된 값들과 함께 가지 값을 식(3)과 같이 계산하고 각각의 스테이트에서 패스 값을 누적한다. Reference 블록에서 가져오는 각 가지의 참조 값들은 그림 5와 같다.

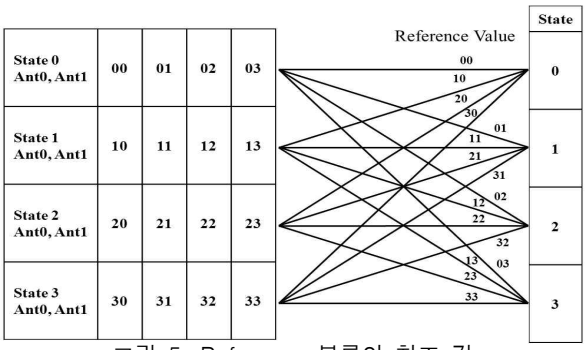

그림 5. Reference 블록의 참조 값
Fig. 5. Reference value of the Reference block

그러나 제안한 시스템의 복조기는 시공간 블록 코드의 복조 기법인 ML(maximum likelihood) 기법을 사용하는 것이 아니기 때문에 식(4)를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다. 식(6)에서 s는 각 스테이트를 나타내고, b는 스테이트 s에서의 가지를 나타내는 인덱스이다. 식(3)을 식(6)으로 변형함으로 인해 5개의 곱셈기를 줄일 수 있다.

$$m(\widetilde{x_0}, x_{s,b}) = d^2(\widetilde{x_0}, x_{s,b}) + d^2(\widetilde{x_1}, x_{s,b}). \quad (6)$$

마지막으로 원 전송 신호를 복원하기 위해서는 식(6)과 같이 구해져 누적된 패스 값들을 data decode 블록으로 보내야 하고 data decode블록에서는 비터비 디코더의 경로 역추적(trace back) 기법을 활용하여 최종적으로 송신단에서 전송한 비트 열들을 찾아내게 된다.

Ⅳ. 시뮬레이션 및 설계 결과

4-1 연접 다이버시티 시스템의 시뮬레이션 결과

이 절에서는 제안한 시스템을 hdl(hardware description language)로 구현하고 그 동작을 modelsim을 활용하여 분석한다. 그림 6은 연접 다이버시티 시스템의 송신단 동작 신호이다. Enable 신호가 high로 변한 뒤 한 클록 뒤부터 데이터는 다이버시티 TCM 코드의 부호화기로 입력되는 것을 확인할 수 있다. 다이버시티 TCM 코드의 부호화된 코드 듀레이션(T_c)은 데이터 비트의 비트 듀레이션(T_b)보다 2배 길다. 따라서 데이터 비트 듀레이션 $2T_b$에 동기화되어 동작하기 위해 data clk 신호가 active low일 경우에 antenna0과 antenna1을 구하는 연산이 수행된다.

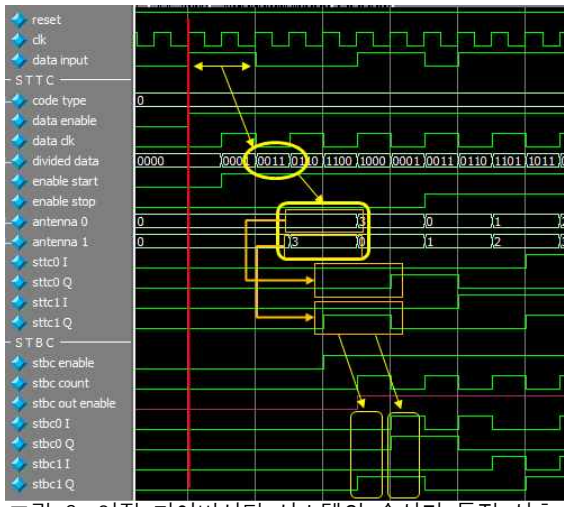

그림 6. 연접 다이버시티 시스템의 송신단 동작 신호
Fig. 6. Operation signal of concatenated diversity system at transmitter.

그림 6의 결과 에서는 위 조건에 해당하는 입력 데이터 비트는 11이고 이 입력 데이터에 따른 부호화된 데이터는 x^1=0, x^2=3이며, 이 신호들은 enable 신호가 high로 set된 후 3클록 후 부터 출력된다. 이 부호화된 데이터들은 QPSK 변조기로 입력되어 00과 01로 변조된다. 시공간 블록 코드의 코드 듀레이션과 다이버시티 TCM 코드의 코드 듀레이션 관계는 $T_{tcm} = 2T_{stbc}$ 이므로 시공간 트렐리스 코드의 부호화기에서 출력된 신호가 시공간 블록 코드의 부호화기로 입력된 후 한 클록 후부터 부호화된 신호가 출력 되는데 첫 번째 클록에서는 원 입력 신호가 두 번째 클록에서는 -stbc1_I는 stbc0_I로 stbc1_Q는 stbc0_Q로 stbc0_I는 stbc1_I로 -stbc0_Q는 stbc1_Q로 부호화되어 출력된다.

그림 7은 연접 다이버시티 시스템의 수신단 동작 신호이다. 실험을 위해 데이터 전송 채널을 레일레이 페이딩 채널을 가정하고 수신단에서는 이 채널 정보를 정확히 알고 있다고 가정한다. Data input 신호에 맞춰 그림 7과 같이 채널 정보와 수신 데이터가 입력되고 이 값들을 이용해 path metric블록에서는 path 값과 branch 값 그리고 버퍼에 저장된 path값을 역 추적 할 수 있도록 해주는 route index를

그림 7. 연접 다이버시티 시스템의 수신단 동작 신호

Fig. 7. Operation signal of concatenated diversity system at receiver.

구하게 된다. 이 값들은 route count가 16이 될 때까지는 계속 누적만 되고 route count가 16이 된 시점부터 저장된 path 값들과 route index를 활용하여 원 데이터 신호를 추정하기 시작한다. 추정된 신호들은 data out enable 신호에 맞추어 출력되는데 data out enable가 high 상태일 동안 출력되는 데이터 비트는 2비트가 출력된다. 신호의 복원결과는 그림 6의 data input 신호와 그림 7의 decoded data를 비교해 보면 알 수 있다. 그림 7의 decoded data를 확인해 보면 그림 6의 data input과 동일함을 보인다.

4-2 연접 다이버시티 시스템의 시뮬레이션 결과

이 절에서는 다이버시티 TCM코드를 연접한 시스템을 하나의 패킷이 전송될 동안 채널환경이 변하지 않는 평탄 페이딩(flat fading) 환경에서 시뮬레이션 하여 그 성능을 분석한다. 실험에 사용된 파라메타는 표 3과 같다. 그림 8은 구속장의 길이가 2인 연접 시공간 다이버시티 시스템을 구속장의 길이가 4인 TCM 코드 그리고 시공간 블록 코드와 성능을 비교한 그래프이다. 10^{-2}의 동일 비트 오류율(BER)에서 성능을 비교 할 때 제안한 시스템의 성능이 TCM 코드보다 약 11dB 우수한 것을 볼 수 있다.

표 3. 시뮬레이션 파라메타

Table 3. Simulation parameters

Parameters	Values
channel	flat fading environments
diversity order	2
code rate	r = 1/2(one dimension)
constraint	2(4state)
modulation	QPSK

이것은 제안한 시스템이 부호화 이득뿐만 아니라 다이버시티 이득을 동시에 갖기 때문이다. 동일한 다이버시티를 차수를 갖는 2개의 송신 혹은 수신 안테나를 갖는 시스템과 동일 다이버시티 차수를 갖는 시스템의 성능을 10^{-3}의 BER에서 비교해 볼 때 제안한 시스템의 성능이 최대 약 10dB 우수하고 다이버시티 차수가 4인 시공간 블록코드와 제안한 시스템의 성능을 10^{-5}의 BER에서 비교해 볼 때 제안한 시스템의 성능이 최대 약 10dB 우수한 것을 볼 수 있다. 이것은 제안한 시스템의 다이버시티 이득이 시공간 블록코드보다 작지만 부호화 이득은 더 크기 때문이다.

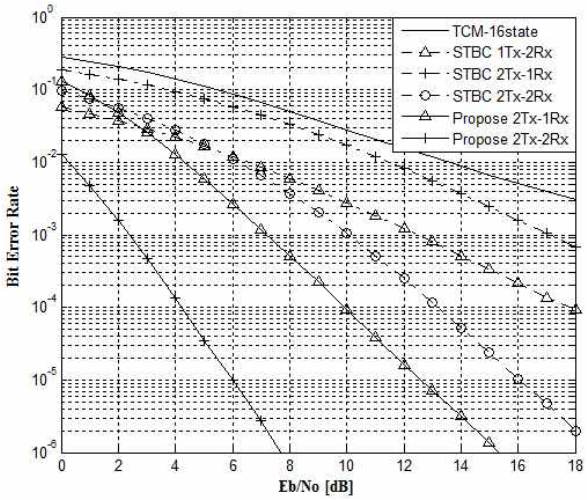

그림 8. 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템과 TCM, 시공간 블록 코드의 성능 비교

Fig. 8. Performance comparition between proposed system, TCM, and STBC code

그림 9는 제안한 시스템과 다이버시티 이득과 부호화 이득을 동시에 갖는 시스템인 시공간 트렐리스 코드(STTC)와 비트 오율 성능을 비교한 그래프이다.

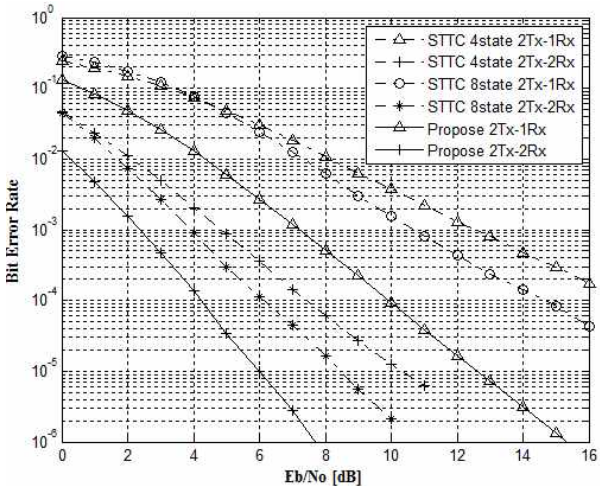

그림 9. 연접 다이버시티 시스템과 시공간 트렐리스 코드의 성능 비교

Fig. 9. Performance comparition between proposed system and space time trellis code

10^{-5}의 BER에서 2개의 송수신 안테나를 사용하는 제안한 시스템의 성능이 최대 성능을 갖는 시공간 트렐리스 코드보다 약 1.5dB 우수하다. 그러나 E_b/N_0의 값이 계속 커지면 그 성능 차는 더 커질 것을 그림 4를 통해 유추할 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 비정형 궤도를 따라 이동하며 통신하는 비행체들 간의 데이터 전송 신뢰성을 보장하기 위해 다이버시티 TCM 코드를 연접한 연접 다이버시티 시스템을 제안하고 그 성능을 분석한 후 HDL을 이용해 설계하였다. 제안한 시스템은 다이버시티 TCM 코드를 연접하였기 때문에 부호화 이득 및 대역 효율성을 높일 수 있으며, 제안한 시스템의 비트 오율 성능(BER)을 시뮬레이션하여 TCM 코드와 비교한 결과 BER 10^{-2}에서 약 11dB 우수 하였고 최대 다이버시티 이득을 갖는 시공간 블록코드와 비교한 결과 BER 10^{-3}에서 약 10dB 우수 하였으며, 다이버시티 이득과 코딩 이득을 갖는 시공간 트렐리스 코드와 비교하였을 경우에는 최대 약 1.5dB 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 제안한 시스템을 HDL로 구현하여 그 동작을 확인해 본 결과 그 동작의 결과가 적합함을 확인하였다. 따라서 비정형 궤도를 따라 이동하며 통신하는 비행형 에어노드간의 신뢰성 있고 대역 효율적인 통신을 하기 위해서는 다이버시티 TCM 코드가 연접된 연접 다이버시티 시스템의 적용이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음 [10039988].

참 고 문 헌

[1] 이현재, 정승희, 오창헌, “RTLS 서비스를 위한 고정밀 위치추정 기법 연구,” *SKTelecom Telecommunications Review, 제18권 제6호*, pp. 1072-1088, October 2008.

[2] Wikipedia. http://ko.wikipedia.org/wiki/후쿠시마_제1_원자력_발전소_사고

[3] Wikipedia. http://ko.wikipedia.org/wiki/체르노빌_원전사고

[4] 강철규, 김대환, “비행형 에어노드의 데이터 전송

신뢰성 향상을 위한 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템," *한국항행학회논문지, 제15권 제6호,* pp.1053-1058, December 2011.

[5] Y. Gong and K. B. Letaief, "Performance evaluation and analysis of space-time coding in unequalized multipath fading links," *IEEE Transactions on Communications, vol. 48,* pp. 1778-1782, November 2000.

[6] W. C. Y. Lee, "Estimate of channel capacity in rayleigh fading environment," *IEEE Trans. on Veh. Technol., vol. 39, no. 3*, August 1990.

[7] Paulraj, Arogyaswami, Rohit Nabar, and Dhananjay Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communications, *Cambridge, UK: Cambridge University Press,* 2003.

[8] Ramseier. S., Schlegel. G, "Bandwidth and power efficiencies of trellis coded modulation schemes," *Global Telecommunications Conference, vol. 3*, pp. 1634-1638, November, 1993

[9] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction," I*EEE Transactions on Information Theroy, vol. 44,* pp. 744-765, March 1998.

[10] 진익수, "빠른 페이딩 채널에서 고속 데이터 전송을 위한 8-PSK 시공간격자 부호의 성능개선," *한국정보기술학회논문지, 제7권 제6호,* pp. 93-98, December, 2009.

[11] Siavash. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal on Select Area in Communications, vol. 16, No. 8,* pp. 1451-1458, October 1998.

강 철 규 (姜澈圭)

2004년 2월 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부(공학사)
2006년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기전자공학과(공학석사)
2012년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기전자공학과(공학박사수료)
2011년 10월 ~ 현재 : 한국전자부품연구원 연구원
관심분야 : MIMO, Wireless Sensor N/W, RFID/USN

박 진 희 (朴眞姬)

1999년 2월 : 동국대학교 컴퓨터공학과(공학사)
2001년 2월 : KAIST ICC 정보공학과 (공학석사)
2008년 2월 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과(공학박사수료)
2001년 1월~현재 : 전자부품연구원 선임연구원
관심분야 : 재난통신, 무선네트워크 프로토콜

오 창 헌 (吳昌憲)

1988년 2월 : 한국항공대학교 항공통신공학과(공학사)
1990년 2월 : 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과(공학석사)
1996년 2월 : 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과(공학박사)
1990년 2월 ~ 1993년 8월 : 한진전자(주) 기술연구소 전임연구원
1993년 10월 ~ 1999년 2월 : 삼성전자(주) CDMA 개발팀 선임연구원
2006년 8월 ~ 2007년 8월 : 방문교수(University of Wisconsin-Madison)
1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수
관심분야 : 이동통신, 멀티미디어 무선통신, Wireless Sensor N/W, CR