한국항행학회 논문지 제 15 권 제 6 호 2011년 12월

비행형 에어노드의 데이터 전송 신뢰성 향상을 위한 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템

Improvement Transmission Reliability between Flight Type Air Node Using Concatenated Single Antenna Diversity

강철규*, 김대환*

Chul-Gyu Kang*, Dae-Hwan Kim*

요 약

본 논문에서는 비정형 궤도를 따라 이동하며 통신하는 비행체들 간의 데이터 전송 신뢰성을 보장하기 위해 컨볼루션 코드를 연접한 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템을 제안하고 이 시스템의 성능을 분석하였다. 제안한 시스템은 단일 안테나를 사용하면서도 다이버시티 이득을 얻을 수 있고 컨볼루션 코드를 연접하였기 때문에 부호화 이득 또한 동시에 얻을 수 있다. 제안한 시스템의 비트 오율 성능(BER: bit error rate)을 시뮬레이션하여 컨볼루션 코드와 비교한 결과 BER 10^{-4}에서 약 9.5dB 우수하였고, 최대 다이버시티 이득을 갖는 시공간 블록코드와 비교한 결과 BER 10^{-3}에서 약 14dB 우수함을 확인 하였다. 마지막으로 부호화 이득과 다이버시티 이득을 동시에 갖는 시공간 트렐리스 코드와 그 성능을 비교하였을 때 10^{-5}의 BER에서 약 4dB 우수하였다. 따라서 비정형 궤도를 따라 이동하며 통신하는 비행형 에어노드간의 신뢰성 있는 통신을 위해서는 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템의 적용이 필요하다.

Abstract

In this paper, we propose a concatenated single antenna diversity system to assure the data transmission reliability between flight type air nodes which move according to their atypical orbit, then analyze its performance. The proposed system achieve a diversity gain using single antenna and a coding gain from convolutional code simultaneously. Simulation result about the bit error rate(BER) of the proposed system shows that its BER performance is about 9.5dB greater than convolutional code at 10^{-4} and about 14dB greater than space time block code at 10^{-3} which has a full diversity gain. In addition, compared with space time trellis code with diversity gain and coding gain, the proposed system shows the better 4dB at a BER of 10^{-5}. Therefore, it is necessary that concatenated single antenna diversity should be adopted to the reliable data transmission of flight type air nodes.

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

* 한국전자부품연구원(RFID/USN Convergence Research Center, Korea Electronics Technology Institute)
· 제1저자 (First Author) : 강철규
· 투고일자 : 2011년 11월 25일
· 심사(수정)일자 : 2011년 11월 25일 (수정일자 : 2011년 12월 31일)
· 게재일자 : 2011년 12월 30일

Ⅰ. 서 론

최근 발전된 IT 기술을 바탕으로 주변의 모든 곳에 센서를 부착하여 사물의 인식정보는 물론 주변의 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 에어 노드 기반의 동적 센서 네트워크 기술이 필요하다. 동적 센서 네트워크 기술은 비행형 노드가 특정 공간을 순환비행 또는 3차원 배열 비행하며 목적한 데이터를 수집하고 분석하여 정보를 제공하는 기술로 고정형 센서 및 감시 장비로 커버할 수 없는 중요시설, 도심지, 재난/재해지역, 방사능 유출지역, 화재지역, 군사 작전지역 등에서 인적손실을 예방하며 신속한 탐색/구조 활동 및 작전을 가능하게 하는 네트워크 기술이다.

그러나 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. 이러한 물리적 특성을 극복하는 대표적인 방법으로 다중안테나 방식(MIMO: Multi-Input Multi-Output)인 시공간 코드와 채널코드가 있다[4],[5].

시공간 코드는 여러 개의 안테나를 송신, 수신단에 설치하고 설치된 안테나를 통해 송신, 수신 다이버시티 이득을 얻는 기술로 시공간 블록 코드(STBC: space time block code)와 시공간 트렐리스 코드(STTC: space time trellis code)가 대표적이다. 그러나 이들 기술들은 안테나의 개수가 증가하면 증가할수록 시스템 구성의 복잡도 및 구현 비용이 증가하는 단점이 있다[6]-[9]. 반면 채널코드는 안테나 수와 관계없이 전송 데이터의 신뢰성을 제공할 수 있으나 비정형으로 이동하며 통신하는 이동체 간의 통신에 높은 신뢰성을 제공하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 단일 안테나를 사용하면서도 최대 다이버시티 이득을 가질 수 있고 채널코드의 부호화 이득을 가질 수 있는 시스템을 제안한다.

Ⅱ. 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템

그림 1은 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템의 블록 다이어그램이다.

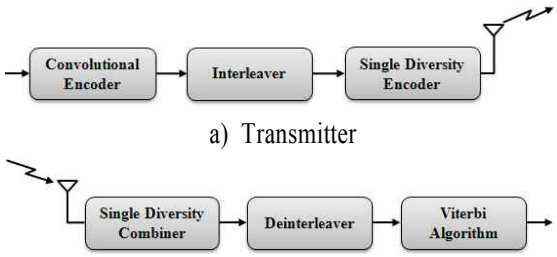

그림 1. 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템의 블록도
Fig. 1. The block diagram of concatenated single antenna diversity system.

그림에서 보이는 것과 같이 입력 데이터는 부호화율이 $1/r$인 컨볼루션 부호화기와 인터리버를 거친 후 단일 안테나 다이버시티 부호화기로 입력되고 이 입력된 데이터는 식(1)과 같이 부호화 되어 전송된다. x^*는 신호 x에 대한 공액 복소수이고, L은 전체 데이터 블럭의 길이이다.

$$x = x_{1,t},\ x_{2,t+\tau},\ -x^*_{2,t+2\tau},\ x^*_{1,t+3\tau}, \quad (1)$$

$$x_{1,2t},\ x_{2,2t+\tau},\ -x^*_{2,2t+2\tau},\ x^*_{1,2t+3\tau}, \cdots$$

$$t = 1, 2, 3, \ldots, L$$

수신단에서는 식(2)와 같은 신호 r을 수신한다.

$$r(t) = h(t)x(t) + n(t) \quad (2)$$

여기서 x는 전송 신호이고 n은 평균이 0이고 분

산이 $N_0/2$인 가우시안(Gaussian) 랜덤 변수이다. h는 시간 t에서 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 페이딩 채널 계수이며, 페이딩 계수의 값은 한 패킷이 전송되는 동안 변하지 않는 것을 가정한다.

수신된 신호들은 다이버시티 컴바이너로 입력되고 컴바이너에서는 식(3)과 같이 송신 신호를 추정하여 비터비 디코더로 전달한다.

$$\widetilde{s_1} = \left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2\right)x_1 + h_1^* n_1 + h_2 n_2^* \quad (3)$$

$$\widetilde{s_2} = \left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2\right)x_2 - h_1^* n_2 + h_2^* n_1$$

비터비 디코더에서는 오류 확률을 최소화하기 위해 식(4)와 같은 가능성 함수(likelyhood function)인 조건 확률$P\left(S \mid U^{(m)}\right)$을 비교하여 최대가 되는 것을 최종 경로로 선택한다.

$$P\left(S|U^{(m)}\right) = \prod_{i=1}^{\infty} P\left(S_i|U_i^{(m)}\right) = \prod_{i=1}^{\infty} P\left(s_{j,i}|u_{j,i}^{(m)}\right) \quad (4)$$

여기서 S_i는 수신 열 S의 i번째 가지이고 $U_i^{(m)}$은 특정 부호어 열 $U^{(m)}$의 i번째 가지이며, $s_{i,j}$는 S_i의 j번째 심벌이고, $u_{i,j}$는 $U_i^{(m)}$의 j번째 부호 심벌이다.

Ⅲ. 성능분석

3-1 채널 코드의 성능분석

그림 1에서 채널 코드로 사용한 컨볼루션 코드의 비트 오류 확률 P_B의 상한 경계(upper bound)는 식(5)와 같다[4].

$$P_B \le \left.\frac{dT(D,N)}{dN}\right|_{N=1,\, D=2\sqrt{p(1-p)}} \quad (5)$$

여기서 $T(D)$는 부호의 생성 함수(generation function)이고 N은 트렐리스도의 가지 천이가 입력 비트 1에 의해서만 1이 증가하는 축적 지수(cumulative exponent) 이고 p는 채널 심벌 오류 확률이다. 만약 부호화 율 $r=1/2$, 구속장의 길이 $K=3$, 생성 다항식 $(7,5)_{oct}$인 컨볼루션 코드가 사용된다면 $T(D,N)$은 식(6)과 같다.

$$T(D,N) = \frac{D^5 N}{1-2DN} \quad (6)$$

이 식은 식(7)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\left.\frac{dT(D,N)}{dN}\right|_{N=1} = \frac{D^5}{(1-2D)^2} \quad (7)$$

식(5)와 식(7)을 결합하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_B \le \frac{\left\{2\sqrt{p(1-p)}\right\}^5}{\left\{1-4\sqrt{p(1-p)}\right\}^2} \quad (8)$$

따라서 컨볼루션 코드를 거친 데이터가 QPSK 변조를 하였을 경우 이 데이터의 비트 오류 확률의 오류 확률 상한은 식(9)와 같으며 여기서 $Q(\bullet)$는 Q 함수를 의미한다.

$$P_B \le Q\left(\sqrt{\frac{5E_b}{N_0}}\right)\exp\left(\frac{5E_b}{2N_0}\right)\frac{\exp\left(-\frac{5E_b}{2N_0}\right)}{\left[1-2\exp\left(\frac{E_b}{2N_0}\right)\right]^2} \quad (9)$$

$$\le \frac{Q\left(\sqrt{\frac{5E_b}{N_0}}\right)}{\left[1-2\exp\left(\frac{E_b}{2N_0}\right)\right]^2}$$

3-2 단일 안테나 다이버시티 시스템 성능분석

그림 1의 수신 안테나에 수신된 신호 $r(t)$가 단일 다이버시티 컴바이너를 거쳐 출력된 신호 $s(t)$는 식(10)과 같다.

$$s(t) = w^H r = w^H h x(t) + w^H n \quad (10)$$

신호 $x(t)$는 단위 평균 파워로 전송되기 때문에 출력 SNR은 식(11)과 같다.

$$\gamma = \frac{|w^H h|^2}{E\left\{|w^H n|^2\right\}} \quad (11)$$

식(11)에서 노이즈의 파워 Pow_n는 식(12)와 같고 여기서 I_N은 단위행렬이다.

$$Pow_n = E\{|w^H n|^2\} = E\{|w^H n n^H w|\} \quad (12)$$
$$= w^H E\{|nn^H|\} w = \sigma^2 w^H I_N w$$
$$= \sigma^2 w^H w = \sigma^2 \| w \|^2$$

식(12)에서 $\| w \|^2$의 값은 항시 1을 갖기 때문에 식(11)의 출력 SNR은 $\gamma = |w^H h|^2 / \sigma^2$이다. 그리고 코시 슈바르쯔(Cauchy-Schwarz) 부등식에 의해 w가 h에 선형적으로 비례할 때 출력 SNR이 최대가 되는 것을 알 수 있다.

$$\gamma = \frac{|h^H h|^2}{\sigma h^H h} = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|h_n|^2}{\sigma^2} = \sum_{n=0}^{N-1} \gamma_n \quad (13)$$

식(13)에서 N은 단일 안테나 시스템의 변조 지수이다. 각 pdf(probability density function)의 콘볼루션은 독립 랜덤 변수 n의 확률 밀도 함수(pdf)의 합과 같고 시간 영역에서의 컨볼루션은 주파수 영역에서 곱과 같음을 이용하여 출력 SNR의 확률 밀도 함수를 다음과 같이 구한다.

$$PDF(\gamma) = f_\Gamma(\gamma) = L^{-1}[F_\Gamma(s)] \quad (14)$$
$$= \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} \frac{e^{s\gamma}}{(1+s\Gamma)^N} d\gamma$$
$$= \frac{1}{(N-1)!} \frac{\gamma^{N-1}}{\Gamma^N} e^{-\gamma/\Gamma}$$

식(14)에서 구해진 확률 밀도 함수 값을 이용해 QPSK 변조한 신호의 오율 한계를 구하면 식(15)와 같고 이 식에서 $\mu = \sqrt{\Gamma/(1+\Gamma)}$이다.

$$P_{BER} = \int_0^\infty erfc(\sqrt{2\gamma}) \frac{1}{(N-1)!} \frac{\gamma^{N-1}}{\Gamma^N} e^{-\gamma/\Gamma} d\gamma \quad (15)$$
$$= \frac{1}{(N-1)!} \left(\frac{1-\mu}{2}\right)^N \left[\sum_{n=0}^{N-1} \frac{(N-1+n)!}{n!} \left(\frac{1+\mu}{2}\right)^n\right]$$
$$\simeq \binom{2N-1}{N} \left(\frac{1}{4\Gamma}\right)^N$$

식(15)에서 알 수 있듯이 P_{BER}은 N의 지수 값 즉 단일 안테나 다이버시티 시스템의 변조 팩터에 따라 지수의 형태로 감소한다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 부호화 율이 $1/2$인 컨볼루션 코드를 단일 안테나 다이버시티 시스템과 연결하여 하나의 패킷이 전송될 동안 채널환경이 변하지 않는 평탄 페이딩(flat fading) 환경에서 시뮬레이션 하여 그 성능을 분석한다. 실험에 사용된 파라메타는 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 파라메타
Table 1. Simulation parameters

Parameters	Values
channel	flat fading environments
diversity order	2
code rate	r = 1/2
constraint	3(4state), 4(8state), 5(16state)
code vector	(7,5), (17, 13), (27, 31)
modulation	QPSK

그림 2는 구속장의 길이가 3, 4, 5인 연접 시공간 다이버시티 시스템과 동일 구속장의 길이를 갖는 컨볼류션 코드의 성능을 비교한 그래프이다. 10^{-4}의 동일 비트 오류율(BER)에서 성능을 비교할 때 구속장의 길이가 5인 제안한 시스템의 성능이 동일 구속장의 길이를 갖는 컨볼루셔널 코드보다 약 9.5dB 우수한 것을 볼 수 있다. 이것은 제안한 시스템이 부호화 이득 뿐만 아니라 다이버스티 이득을 동시에 갖기 때문이다.

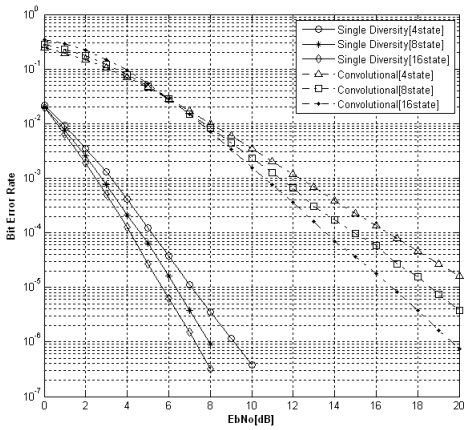

그림 2. 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템과 컨볼류션 코드의 성능 비교
Fig. 2. Performance comparition between proposed system and convolution code

그림 3은 제안한 시스템과 다이버시티 차수가 2, 4인 시공간 블록코드(STBC)의 성능을 비교한 그래프이다.

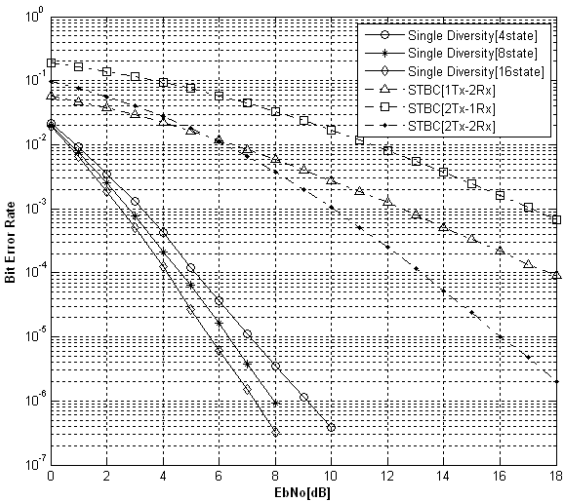

그림 3. 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템과 시공간 블록 코드의 성능 비교

Fig. 3. Performance comparition between proposed system and space time block code

동일한 다이버시티를 차수를 갖는 2개의 송신 혹은 수신 안테나를 갖는 시스템과 구속장의 길이가 5(16state)인 시스템의 성능을 10^{-3}의 BER에서 비교해 볼 때 제안한 시스템의 성능이 최대 약 14dB 우수한 것을 알 수 있다.

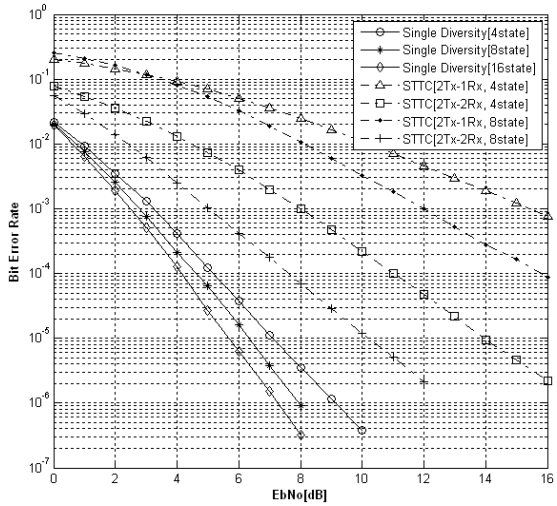

그림 4. 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템과 시공간 트렐리스 코드의 성능 비교

Fig. 4. Performance comparition between proposed system and space time trellis code

그림 4는 제안한 시스템과 다이버시티 이득과 부호화 이득을 동시에 갖는 시스템인 시공간 트렐리스 코드(STTC)와 비트 오율 성능을 비교한 그래프이다. 10^{-5}의 BER에서 8state의 제안한 시스템의 성능이 최대 성능을 갖는 시공간 트렐리스 코드보다 약 4dB 우수하다. 이것은 제안한 시스템의 부호화 이득과 다이버시티 이득이 STTC의 부호화 이득과 다이버시티 이득보다 크기 때문이다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 비정형 궤도를 따라 이동하며 통신하는 비행체들 간의 데이터 전송 신뢰성을 보장하기 위해 컨볼루션 코드를 연접한 연접 단일 안테나 다이버시티 시스템을 제안하고 이 시스템의 성능을 수치 및 컴퓨터 시뮬레이션 하여 분석하였다.

제안한 시스템의 비트 오율 성능을 채널 코드 중 하나인 컨볼루션 코드와 비교하였을 때 10^{-4}에서 약 9.5dB 우수하였고 동일 다이버시티 차수를 갖는 시공간 블록 코드와 비교하였을 때 10^{-3}의 BER에서 최대 약 14dB 우수함을 확인 하였다. 마지막으로 부호화 이득과 다이버시티 이득을 동시에 갖는 시공간 트렐리스 코드와 그 성능을 비교하였을 때 10^{-5}의 BER에서 시공간 트렐리스 코드보다 약 4dB 우수함을 확인하였다.

이 결과들로 볼 때 비정형 궤도를 따라 이동하며 통신하는 비행형 에어노드간의 신뢰성 있는 통신을 위해서는 연접 단일 안테나 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] Viterbi, A., "Convolutional codes and their performance in communication systems," *IEEE Trans. Commun. Technol.,* vol. Com 19, no. 5, pp. 751-772, October 1971.
[5] 김길남, 안진영, 김상준, "Time-Switched 수신 다이버시티를 이용하는 Prerake UWB MIMO 시스템 성능," *한국정보기술학회논문지,* 제9권 제4호, pp. 71-78, 2011. 4.
[6] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction," *IEEE Transactions on Information Theroy*, vol. 44, pp. 744-765, March 1998.
[7] 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.
[8] 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.
[9] 진익수, "느린 페이딩 채널에서 개선된 4-PSK 시공간 격자부호의 성능평가," *한국정보기술학회논문지,* 제8권 제5호, pp. 61-68, 2010. 5.

강 철 규 (姜澈圭)

2004년 2월 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부(공학사)
2006년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기전자공학과(공학석사)
2007년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기전자공학과(박사과정)
20011년 10월 ~ 현재 : 한국전자부품연구원 RFID/USN 융합센터 연구원
관심분야 : MIMO, Wireless Sensor N/W

김 대 환 (金大煥)

1991년 2월 : 명지대학교 전자공학과(공학사)
1993년 2월 : 명지대학교 전자공학과(공학석사)
1993년 3월 ~ 현재 : 전자부품연구원 융합산업본부 RFID/USN융합연구센터 수석연구원
2006년 3월 ~ 현재 : 아주대학교 전자공학과(박사수료)
관심분야 : RFID/USN, 임베디드 시스템