

도착시간차가 존재하는 레일레이 페이딩 채널에서 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템의 성능

이 주 현, 이 재 홍
서울대학교 전기컴퓨터공학부
전화 : 02-880-8430

Performance for a Space-time Coded DS-CDMA system with arrival time difference in a Rayleigh fading channel

Joo Hyun Yi and Jae Hong Lee
School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University
E-mail : johyuny@snu.ac.kr

Abstract

In this paper, the natural space-time coding is applied for a DS-CDMA system with multiple transmit/receive antennas in a Rayleigh fading channel. With difference of arrival times from transmit antennas a modified maximum likelihood (ML) decoding algorithm is proposed for the space-time coded DS-CDMA system. The proposed decoding algorithm performs ML decoding over the transition of two consecutive branches by using a modified branch metric with the partial auto-correlation. By simulation, it is shown that the proposed decoding algorithm achieves significant performance improvement over the ML decoding algorithm without the modified branch metric.

I. 서론

시공간부호화(space-time coding) 기술은 다수의 송수신안테나를 갖는 무선통신 시스템에서 다이버시티 이득과 부호화 이득을 동시에 얻기 위해 제안되었다. 랭크(rank) 조건과 행렬식(determinant) 조건을 만족하는 시공간부호를 사용함으로써 최대의 다이버시티 이득과 부호화 이득을 달성할 수 있으며, 부호화된 데이터를 다수의 송수신안테나에 나누어 전송함으로써 프레임 주기 동안 불변인 채널을 갖는 협대역 무선통신 시스템에서 높은 데이터 전송률을 달성할 수 있다[1],[2].

시공간부호화에 관한 대부분의 연구들은 송수신안테나 사이의 채널이 서로 독립적이며, 송수신안테나들로부터

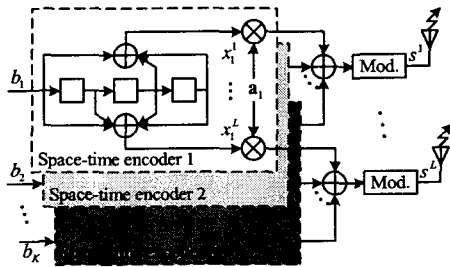
의 전송된 신호는 수신안테나에 동시에 도착한다고 가정하였다. 그러나 송수신안테나들 사이의 간격을 충분히 띄워 채널 페이딩을 독립적으로 만드는 경우, 송수신안테나 사이의 경로차에 의해 도착시간에 차이가 발생한다. 이러한 도착시간차(arrival time difference)는 심볼간간섭(inter-symbol interference)을 일으켜 시공간부호화된 시스템의 성능을 저하시킨다. 이러한 심볼간간섭을 완화하기 위해서는 이와 관련된 연속적인 두 상태(state)의 천이에 대한 경로계량(path metric)을 계산하는 변형된 최우도(maximum likelihood) 복호 알고리즘이 사용된다[3].

높은 전송률의 무선통신 서비스에 대한 요구를 충족시키기 위해 시공간부호화 기술은 코드분할다원접속(code-division multiple-access: CDMA) 시스템에도 적용된다[4]. 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템에서 도착시간차는 심볼간간섭뿐만 아니라 시그너처시퀀스(signature sequence) 간의 직교성 상실에 의한 다원접속간섭(multiple-access interference)을 발생시킨다. 또한 다수 송수신안테나 중의 하나에 동기가 맞춰진 시그너처시퀀스로 역확산(despreading)하는 경우, 나머지 송수신안테나로부터 송신된 동기가 다른 자기신호들마저 간섭신호와 같이 역제되어 시스템의 성능이 크게 저하된다. 본 논문에서는 도착시간차가 존재하는 레일레이 페이딩 채널에서 심볼간간섭과 다원접속간섭을 완화하기 위해서 두 연속된 심볼에 대해 시그너처시퀀스의 부분자기상관(partial autocorrelation)을 고려한 변형된 최우도 복호 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 II절에서는 자연(natural) 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템을 설명하고, III절에서는 부분자기상관을 이용하여 변형

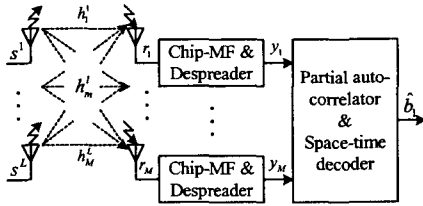
된 최우도 복호 알고리즘을 제안한다. IV절에서 모의 실험 결과를 보이고 V절에서 결론을 맺는다.

II. 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템

K 명의 사용자가 있는 DS-CDMA 시스템의 다운링크(downlink)를 고려한다. 그림 1은 L 개의 송신안테나와 M 개의 수신안테나를 가진 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템의 블록도를 보이고 있다.



(a) 송신기



(b) 채널 및 수신기

그림 1. L 개 송신안테나와 M 개 수신안테나를 가진 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템

k 번째 사용자의 i 번째 데이터 비트인 $b_k(i)$ 는 길이 L 인 부호어 $\mathbf{x}_k(i) = (x_k^1(i), \dots, x_k^L(i))$ 로 시공간부호화 되고, 길이 N 인 시그너처시퀀스 $\mathbf{a}_k = [a_{k,0}, a_{k,1}, \dots, a_{k,N-1}]$ 와 곱해져서 각 송신안테나로 맵핑된다. l 번째 송신안테나로부터 송신되는 기저대역 신호는 다음과 같다.

$$s^l(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^K x_k^l(i) a_k(t - iT_s) \\ = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^K x_k^l(i) \sum_{n=0}^{N-1} a_{k,n} \varphi(t - iT_s - nT_c) \quad (1)$$

여기서 $a_k(t)$ 는 시그너처파형, $\varphi(t)$ 는 단위에너지를 갖는 사각 칩펄스, T_s 는 심볼주기, T_c 는 칩주기이다.

각 송수신안테나 사이의 채널은 i.i.d 레일레이 페이딩을 가지며, l 번째 송신안테나에서 m 번째 수신안테나로의 상대적인 도착지연시간은 τ_m^l 이라고 가정한다. 이러한 채널을 통해 m 번째 수신안테나에 수신된 기저대역의 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$r_m(t) = \sqrt{E_s} \sum_{i=1}^L \alpha_m^l(t) e^{j\theta_m^l(t)} s(t - \tau_m^l) + n_m(t) \quad (2)$$

여기서 $E_s = E_b/L$ 은 비트 에너지를 송신안테나의 수로 나눈 심볼에너지, $\alpha_m^l(t)$ 와 $\theta_m^l(t)$ 는 각각 레일레이 페이딩의 크기와 위상, $n_m(t)$ 는 전력밀도가 N_0 인 가우시안 잡음이다.

칩 정합필터(chip matched-filter)를 통해 칩주기로 추출된 신호는 한 심볼주기동안 수신심볼벡터 $\mathbf{r}_m(i) = [r_{m,0}(i), r_{m,1}(i), \dots, r_{m,N-1}(i)]$ 를 구성한다. 채널의 페이딩은 한 프레임주기동안 변하지 않을 만큼 느리며, 도착 지연시간 τ_m^l 은 정수 $d_m^l \in [0, N-1]$ 에 대해 $d_m^l T_c$ 로 가정한다. $\tilde{\mathbf{a}}_k(d)$ 는 시그너처시퀀스 \mathbf{a}_k 의 변형된 시퀀스로서 n 번째 성분은 다음과 같이 정의한다.

$$[\tilde{\mathbf{a}}_k(d)]_n = \begin{cases} a_{k,n-d} I_{n \geq d \geq 0} & \left\{ n = 0, 1, \dots, N-1 \right. \\ a_{k,n-d} I_{n-N < d < 0} & \left. \left\{ d = -N+1, \dots, N-1 \right. \right. \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $I_A = \begin{cases} 1, & \text{if } A \\ 0, & \text{if } \bar{A} \end{cases}$ 는 사건 A 에 대한 지표함수(indicator function)이다. 식(6)의 정의로부터 시그너처시퀀스 \mathbf{a}_k 는 $\tilde{\mathbf{a}}_k(0)$ 와 동일하며, 수신심볼벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{r}_m(i) = \sqrt{E_s} \sum_{l=1}^L h_m^l(i) \sum_{k=1}^K \left\{ x_k^l(i-1) \tilde{\mathbf{a}}_k(d_m^l - N) + x_k^l(i) \tilde{\mathbf{a}}_k(d_m^l) \right\} + \mathbf{n}_m(i) \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{n}_m(i)$ 는 실수부와 허수부의 분산이 $N_0/2$ 인 N 개의 독립적인 복소 가우시안 확률변수로 구성된 잡음 벡터이다.

III. 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템에서의 역확산과 복호

3.1 도착시간차가 없는 경우의 최우도 복호

도착지연시간 d_m^l 이 모두 0이라고 가정하면 첫 번째 사용자에게 대해 시그너처시퀀스로 역확산된 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$y_m(i) = \left\{ \sqrt{E_s} \sum_{l=1}^L h_m^l(i) \sum_{k=1}^K x_k^l(i) \mathbf{a}_k + \mathbf{n}_m(i) \right\} \mathbf{a}_1^T \\ = \chi_m(\mathbf{x}_1(i)) + \eta_m(i) \quad (5)$$

여기서

$$\chi_m(\mathbf{x}_1(i)) = \sqrt{E_s} \sum_{l=1}^L h_m^l(i) x_1^l(i) \quad (6a)$$

$$\eta_m(i) = \sqrt{E_s} \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^L h_m^l(i) x_k^l(i) \gamma_{k,1} + n_m(i) \quad (6b)$$

$\gamma_{k,1}$ 는 k 번째 사용자와 첫 번째 사용자 시그너처시퀀스 사이의 상호상관(cross-correlation)이다. 직교 시그너처시퀀스를 사용하여 상호상관이 0이거나 그 값이 매우 작은 경우의 다원접속간섭은 잡음으로 간주될 수

도착시간차가 존재하는 레일레이 페이딩 채널에서 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템의 성능

이므로, 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템의 복호는 단일사용자를 가진 일반적인 시공간부호 시스템의 최우도 복호를 그대로 사용할 수 있다[1].

3.2 도착시간차가 있는 경우의 최우도 복호

편의상 첫 번째 송신안테나로부터의 도착시간지연은 0으로 가정하고 $\gamma_{i(a),j(b)}$ 를 시퀀스 $\tilde{\mathbf{a}}_i(a)$ 와 $\tilde{\mathbf{a}}_j(b)$ 의 상호상관으로 정의한다. 식(7)로부터 첫 번째 송신안테나에 대해 동기가 맞춰진 첫 번째 사용자의 시그너처시퀀스로 역확산된 수신심볼은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{y}_m(i) = \mathbf{r}_m(i)\mathbf{a}_1^T = \chi_m(\mathbf{x}_1(i-1), \mathbf{x}_1(i)) + \eta_m(i) \quad (7)$$

여기서

$$\chi_m(i) = \sqrt{E_s} \left\{ \sum_{l=2}^L h_m^l(i) x_1^l(i-1) \gamma_{1(d_m^l-N),1} + \sum_{l=1}^L h_m^l(i) x_1^l(i) \gamma_{1(d_m^l-N),1} \right\} \text{이고} \quad (8a)$$

$$\eta_m(i) = \sqrt{E_s} \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^L h_m^l(i) \left\{ x_k^l(i-1) \gamma_{k(d_m^l-N),1} + x_k^l(i) \gamma_{k(d_m^l-N),1} \right\} + n_m(i) \quad (8b)$$

이다.

식(8a)로부터 도착시간차가 있는 경우의 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템에서는 부분자기상관 $\gamma_{1(d_m^l-N),1}$ 에 의해 심볼간섭이 발생하여 기존의 최우도 복호 알고리즘을 사용하면 성능이 저하된다. 이를 완화하기 위해 두 연속적인 심볼 $x_1^l(i-1)$ 과 $x_1^l(i)$ 에 관련된 상태천이에 대해 부분자기상관을 포함한 변형된 최우도 복호 알고리즘을 제안한다.

사용자가 충분히 많은 경우 간섭과 잡음을 포함한 $\eta_m(i)$ 는 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 참고문헌 [3]에 의해 두 연속적인 상태천이에 대한 최우도 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\max_{\mathbf{x}_1} p(\mathbf{r}_m | \mathbf{x}_1) = \min_{\mathbf{x}_1} \sum_{i=0}^{L_F-1} |y_m(i) - \chi_m(\mathbf{x}_1(i-1), \mathbf{x}_1(i))|^2 \quad (9)$$

여기서 L_F 는 프레임의 길이이고 $\mathbf{x}_1 = (\mathbf{x}_1(0), \mathbf{x}_1(1), \dots, \mathbf{x}_1(L_F-1))$ 는 원하는 사용자의 프레임시퀀스이다. 주어진 이전 상태 s_{i-1} 에 대해 상태 s_i 에서 s_{i+1} 로 천이하는 경우 경로계량과 천이계량을 각각 $M_{s_i, s_{i+1}}(s_i | s_{i-1})$ 과 $\Delta_{s_i, s_{i+1}}(s_i | s_{i-1})$ 로 정의하자. 천이계량은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta_{s_i, s_{i+1}}(s_i | s_{i-1}) = |y_m(i) - \chi_m(\mathbf{x}_1(i-1), \mathbf{x}_1(i))|^2 \quad (10)$$

여기서 $\mathbf{x}_1(i-1)$ 과 $\mathbf{x}_1(i)$ 은 각각 상태천이 (s_{i-1}, s_i) 와 (s_i, s_{i+1}) 에서 출력된 부호어이다. 제안된 부분자기상관을 이용한 복호 알고리즘은 다음과 같이 주어진다.

For 모든 상태 s_{i+1}

For 상태 s_{i+1} 로 천이하는 모든 상태 s_i

For 상태 s_i 로 천이하는 모든 상태 s_{i-1}

$$M_{s_{i+1}}(s_i | s_{i-1})$$

$$= M_{s_{i-1}}^* + \Delta_{s_i}(s_{i-1} | s_{i-2}) + \Delta_{s_{i+1}}(s_i | s_{i-1}) \text{ 계산}$$

End

$$s_{i-1}^* = \arg \min_{s_{i-1}} M_{s_{i+1}}(s_i | s_{i-1}) \text{ 선택}$$

$$M_{s_i}^* = M_{s_{i-1}}^* + \Delta_{s_i}(s_{i-1}^* | s_{i-2}^*) \text{ 계산}$$

$$M_{s_i}^*, s_{i-1}^*, \Delta_{s_{i+1}}(s_i | s_{i-1}^*) \text{ 저장}$$

End

End

여기서 *는 계량을 최소로 하도록 선택된 변수를 표시한다.

3.3 도착시간차가 있는 경우의 부분자기상관 결합을 이용한 최우도 복호

첫 번째 송신안테나로부터 전송된 심볼 $x_1^l(i)$ 의 도착지연시간에 동기된 시그너처시퀀스 \mathbf{a}_1 에 의한 역확산은 도착시간차에 의해 동기가 어긋나게 수신된 다른 송신안테나들로부터의 심볼 $x_1^l(i)$, $l=2, \dots, L$ 을 간섭 사용자의 심볼과 같이 억제한다. 이러한 원하는 사용자 신호의 억제를 보상하기 위해 도착시간차를 고려하여 변형된 시그너처 시퀀스의 합으로 역확산할 수 있다. 이러한 경우 역확산된 수신심볼은 다음과 같이 주어진다.

$$\tilde{\mathbf{y}}_m(i) = \mathbf{r}_m(i) \sum_{l=1}^L \left\{ \tilde{\mathbf{a}}_1(d_m^l - N) + \tilde{\mathbf{a}}_1(d_m^l) \right\}^T = \tilde{\chi}_m(\mathbf{x}_1(i-1), \mathbf{x}_1(i)) + \tilde{\eta}_m(i) \quad (11)$$

여기서

$$\tilde{\chi}_m(\mathbf{x}_1(i-1), \mathbf{x}_1(i)) = \sqrt{E_s} \sum_{l=1}^L h_m^l(i) \left[x_1^l(i) \sum_{j=1}^L \left\{ \gamma_{1(d_m^l), 1(d_m^l-N)} + \gamma_{1(d_m^l), 1(d_m^l)} \right\} + x_1^l(i-1) \sum_{j=1}^L \left\{ \gamma_{1(d_m^l-N), 1(d_m^l-N)} + \gamma_{1(d_m^l-N), 1(d_m^l)} \right\} \right] \text{이고} \quad (12a)$$

$$\tilde{\eta}_m(i) = \sqrt{E_s} \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^L h_m^l(i) \left[x_k^l(i) \sum_{j=1}^L \left\{ \gamma_{k(d_m^l), 1(d_m^l-N)} + \gamma_{k(d_m^l), 1(d_m^l)} \right\} + x_k^l(i-1) \sum_{j=1}^L \left\{ \gamma_{k(d_m^l-N), 1(d_m^l-N)} + \gamma_{k(d_m^l-N), 1(d_m^l)} \right\} \right] + \sqrt{L} n_m(i) \quad (12b)$$

이다.

부분자기상관의 결합을 이용한 복호 알고리즘은 앞절에서 제안된 복호 알고리즘에서 $y_m(\cdot)$ 과 $\chi_m(\cdot)$ 을 $\tilde{y}_m(\cdot)$ 과 $\tilde{\chi}_m(\cdot)$ 으로 대체함으로써 구현된다.

IV. 모의실험 결과

수신기에서 채널 페이딩과 도착지연시간에 대한 추정 정확하다고 가정하고, 송신안테나의 수 $L=2$, 수신안테나의 수 $M=1, 2$ 인 DS-CDMA 시스템을 고려한다. 시그너처시퀀스로는 길이 31인 골드시퀀스(Gold sequence)를 사용한다. 시공간부호로는 상태수 8이고 BPSK인 1/2 길쌈부호 (64), (74)를 사용하며 한 프레임은 260심볼로 구성된다. 최대 도플러 주파수 f_D 와 프레임주기 T_f 의 곱인 페이딩률 $f_D T_f$ 는 0.001 이고, 도착지연시간 $\tau_m^l \in [0, 10T_c]$ 로 가정한다.

그림 2는 도착시간차가 존재하는 레일레이 페이딩 채널에서 $L=2, M=1$ 인 자연 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템의 비트오율을 보인다. 기존의 최우도 복호(Conv. ML) 알고리즘은 도착시간차에 의한 성능저하로 제대로 동작하지 못하는 반면, 제안된 자기상관을 이용한 복호 알고리즘(PA ML)과 자기상관의 결합을 이용한 복호 알고리즘(Comb. ML)은 성능의 저하를 완화시킴을 보여준다. 또한, $L=1$ 인 경우에 해당하는 기존 CDMA 시스템에 비해 $L=2$ 이상인 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템에서는 사용자 수의 증가에 따른 성능저하의 정도가 더욱 심한 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 동일한 채널환경에서 $M=2$ 인 경우의 비트오율을 보인다. 수신안테나 수가 증가함에 따라 성능향상의 정도가 증가한다. 특히 제안된 자기상관의 결합을 이용한 복호 알고리즘의 성능은 도착시간차가 없는 레일레이 페이딩 채널에서 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템을 최우도 복호한 경우의 비트오율에 근접하였다.

V. 결론

본 논문에서는 시공간부호화 기법을 다수의 송신안테나를 가지는 DS-CDMA 시스템에 적용하고, 도착시간차가 존재하는 레일레이 페이딩 채널에서 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템을 위한 복호 알고리즘을 제안하고 그 성능을 평가하였다. 모의실험 결과로부터 도착시간차가 존재하는 레일레이 페이딩 채널에서 기존의 최우도 복호 알고리즘은 성능저하가 심각하여 적용하기 어려운 반면, 제안된 자기상관을 이용한 복호 알고리즘과 자기상관의 결합을 이용한 복호 알고리즘은 이러한 성능저하를 완화하여 우수한 성능을 보였다. 또한 수신안테나 수가 증가함에 따라 제안된 복호 알고리즘은 도착시간차가 없는 채널에서 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템을 최우도 복호한 경우의 비트오율에 근접하였다.

참고문헌

[1] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 744-765, Mar. 1998.

[2] A. R. Hammons and H. E. Gamal, "On the theory of space-time codes for PSK modulation," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 524-542, Mar. 2000.

[3] A. M. Tehrani, R. Negi, and J. Cioffi, "Space-time coding over a code division multiple access system," *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference 99*, pp. 134-138, Sept. 1999.

[4] K. Jo and H. Kim, "Decoding of space-time codes for Rayleigh flat fading with arrival time differences," *IEEE Electronics Letters*, vol. 36, no. 23, pp. 1936-1937, Nov. 2000.

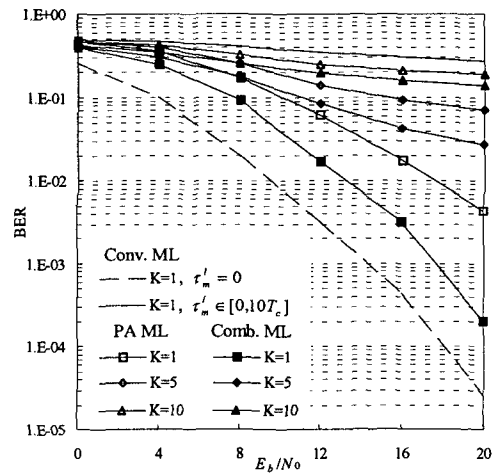


그림 2. 레일레이 페이딩 채널에서 $L=2, M=1$ 인 자연 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템의 비트오율

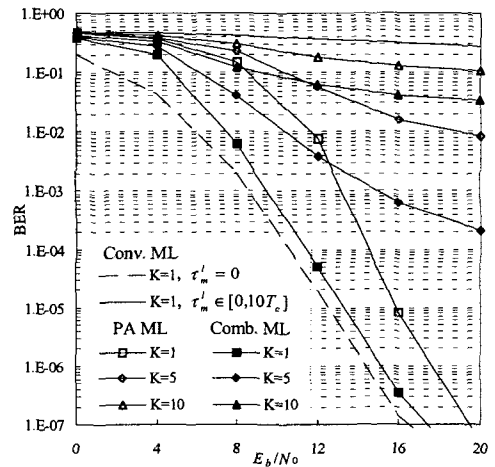


그림 3. 레일레이 페이딩 채널에서 $L=2, M=2$ 인 자연 시공간부호화된 DS-CDMA 시스템의 비트오율