수신 신호의 도착 지연 차이를 갖는 MIMO CDMA 채널에서 코드 동기 성능 향상 방안 연구.

권윤주, 구정회, 김경호*, 이충용
연세대학교 미디어통신신호처리 연구실
삼성전자 통신연구소 모뎀 ASIC LAB*

A New Code Acquisition Scheme for MIMO CDMA Channel with Slightly Different Arrival Time by Hopping Pilot Data.

Yoonjoo Kwon, Jeonghoe Ku, Kyungho Kim*, Chungyong Lee
MCSP Lab., Yonsei Univ
Modem ASIC Lab, Samsung Electronics Co. Ltd*
E-mail : namgae@mcsp.yonsei.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 다중안테나 시스템(Multiple-Input Multiple-Output : MIMO)과 다중코드(Multicode)를 사용하는 코드분할 다중접속(Code Division Multiple Access : CDMA) 시스템의 하향링크(from the base station to the mobile) 환경하에서 채널응답의 중요한 요소인 전송지연시간(Propagation Delay Time)이 기존의 단일안테나(Single-Input Single-Output : SISO) 채널 환경에서 다중안테나 채널 환경으로 바뀌어 적용되었을 때 발생할 수 있는 환경 변화를 찾아보고 그러한 환경이 코드 동기 성능에 미치는 영향과 그러한 문제점을 해결할 수 있는 효율적인 파일롯(Pilot) 전송 기법을 제안 하였다. 또한 모의 실험을 통하여 도착 시간 지연 차이의 분산(variance)값이 검파 성능에 미치는 영향을 확인 하였다.

I. 서론

차세대 무선 이동 통신 기술의 가장 중요한 요소중의 하나로서 다양한 멀티미디어 기능을 효과적으로 지원 할 수 있는 고속 데이터 서비스를 들 수 있다. 다양한 멀티미디어 서비스를 제공하기 위한 기법으로 다중코드(Multicode) 기법과 다중안테나를 사용하는 MIMO BLAST(Bell Labs Layered Space-Time)[1] 기법들이 주목 받아 왔다. 본 논문에서는 BLAST 기술을 MIMO CDMA 시스템에 적용하여 송수신 다중안테나 상호간의 위치에 따라서 수신 안테나에 도착하는 신호가 한 칩 이내로 서로 다른 지연 시간을 갖고 입력 되었을 때 코드 동기 성능에 미치는 영향을 관찰하고 이를 해결하기 위한 성능 향상 기법을 제안하다. 초기의 BLAST 관련 연구들은 일대일(point-to-point) 통신 그리고 협대역 채널 환경에 적용되어 진행되어 왔고 최근에는 BLAST 기술을 MIMO CDMA 시스템에 적용하여 다중 사용자 환경에서의 성능 분석에 대한 연구가 진행되었다.[2] 협대역 채널 환경에서 수신 신호의 작은 지연 차이는 심볼시간과 비교 할 때 매우 작으므로 큰 영향을 미치지 않지만 광대역 다중 사용자 시스템에 적용되었을 때 작은 신호 지연 차이는 신호의 칩 샘플 단위와 비슷하게 되므로 더 이상 도착 지연 차이를 무시 할 수 없게 된다. 또한 동시에 많은 정보를 전송하기 위해서 다중안테나를 이용할 경우 각 사용자가 다중 코드를 사용하기 때문에 각 수신 안테나에 각기 다른 확산 코드를 갖고 서로 다른 채널을 통과한 신호가 한 칩 이내의 차이를 갖고 입력 된다. 이러한 공간 다중화된 신호의 지연 시간 차로 인하여 코드간의 직교성(Orthogonality)이 상실되고 이로 인해 심각한 코드 동기 성능의 저하가 발생된다. 본 논문에서는 채널 파라미터를 추적 하기 위한 파이롯 채널이 있다고 가정하여 간단하면서 효율적인 파일롯 채널 전송 기법을 제안하고 코드 시간 동기 개선 효과와 시간 차이를 갖고 입력되는 신호들에 대한 코드 동기 성능 결과가 검파 성능에 미치는 영향을 모의 실험을 통하여 분석하였다. II장에서는 제안한 기법이 적용될 M 개의 송신 안테나와 P 개의 수신 안테나를 사용하는 MIMO CDMA 시스템의 송신 데이터 전송 기법과 수신기 모델을 정의하고 III장에서는 제안된 기법에 대한 설명을 한다. IV장에서는 실험을 통하여 제안된 기법의 성능 향상 결과를 보이고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 전송 기법과 수신기 모델

본 절에서는 MIMO CDMA 하향 링크 시스템에서 확산 코드,

다중 송수신 안테나 수 독립적인 Rayleigh 페이딩 채널을 고려하여 전송 기법과 코드 성능 평가를 위한 수신기 모델을 정의한다. 먼저 파일롯 채널이 아닌 일반 데이터 채널일 경우 송신 단에서는 각 사용자의 고속 데이터열을 G 개의 등속 부 전송열로 공간다중화 한 후 각 송신 안테나를 통하여 전송 한다. 그림1.은 전송 다이버시티(Transmit Diversity) 차수가 2 ($M_t = 2$) 인 일반 채널 코드 전송 기법을 나타내며 행은 사용되는 안테나(M) 번호를 나타내며 열은 사용되는 확산 코드를 나타낸다. 각 사용자의 부 전송열은 길이 N(T/T_c: Processing Gain)의 코드에 의하여 확산 되어 M개의 송신 안테나 중에서 하나를 통하여 전송된다.

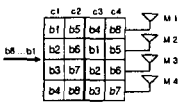

그림 1. 일반채널

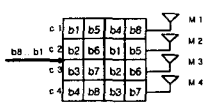

그림 2. 파일롯 채널

좀 더 일반적으로 전송열 $g(g=1...G)$ 와 송신 안테나 $m(m_t=1...M_t)$ 사이의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$m=[(m_t+g-2) \bmod M]+1. \quad (1)$$

그림2.은 파일롯 채널의 코드 전송 기법을 나타내며 각 송신 안테나마다 하나의 코드가 할당 된다. 파일롯 채널의 모든 데이터가 "1"일 경우 각 안테나마다 하나의 확산 코드가 전송 된다. 본 논문에서는 기 설명한 코드 전송 기법을 사용하여 MIMO CDMA 시스템을 구성한다. 수신기 모델은 사용자의 복소(Complex) 기저대역(Baseband) 수신신호를 고려하고 고속의 데이터를 전송하는 각 사용자는 G 개의 부 전송열을 M 개의 송신 안테나를 통하여 전송한다. 수신단에 각 사용자는 G 개의 부 전송열을 복조하기 위하여 P 개의 수신 안테나를 사용한다. L 개의 탭을 가지는 다중 경로 채널 환경에서 채널을 통과한 신호가 p 번째 수신 안테나에서 수신된 신호 $r_p(t)$ 는

$$\underline{r}_p(t)=\sum_{g=1}^{G}\sum_{l=1}^{L}\sum_{m_t}^{M_t}\sum_{k=1}^{K}C_{k,g,m_t}(t-\tau_{m,l,p})H_{m(g,m_t),l,p}A_{k,l}b_{k,g}+n_p(t) \quad (2)$$

여기서 $H_{m(g,m_t),l,p}$ 은 m 번째 송신 안테나와 p 번째 수신 안테나 사이의 복소 채널, $A_{k,l}$ 은 k 번째 사용자의 l 번째 경로의 신호 크기, $C_{k,g,m_t}(t-\tau_{m,l,p})$ 은 m 번째 안테나를 통하여 전송되는 k 번째 사용자의 g 번째 부 전송열에 사용되는 확산 코드, $C_{k,g,m_t}(t)\in\{+1,-1\}, t\in[0,T)$, $C_{k,g,m_t}(t)=0, t\notin[0,T)$, 여기서 T 은 한 심볼 구간이다. $\tau_{m,l,p}$ 은 m 번째 송신 안테나와 p 번째 수신 안테나 사이의 l 번째 경로에 대한 전송 지연이고, $\tau_{m,l,p}=d_l+\delta_{m,l,p}$ 으로 표현 된다. d_l 은 다중경로에 대한 정수 지연값을 나타내며 $\delta_{m,l,p}$ 은 독립 적인 채널 마다 한 칩 이내의 다른 도착 지연 시간차이고 식 (3)의 분포를 따른다.

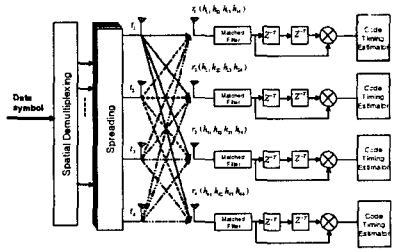

그림 3. MIMO CDMA 파일롯 채널 수신기 구조

$$\delta_{m,l,p}\sim N(0,1) \quad (3)$$

$b_{k,g}$ 는 k 번째 사용자의 g 번째 부 전송열의 데이터 심볼이고 $n_p(t)$ 는 복소 가우시안 잡음으로 영평균과 σ_n^2 의 분산을 가진다. 수신 신호는 칩 단위 정합필터(Matched-Filter)에 의하여 샘플링 된 이산 복소 기저대역 수신 신호를 N 벡터로 표현 할 수 있다.

$$\underline{r}_p=\frac{1}{\sqrt{M}}CHA\underline{b}+\underline{n}_p \quad (4)$$

여기서

$$C=[\underline{c}_{111},\overline{c}_{111},...,\underline{c}_{11L},\overline{c}_{11L},...,\underline{c}_{1M_t1},\overline{c}_{1M_t1},...,\underline{c}_{1M_tL},\overline{c}_{1M_tL},...,$$
$$\underline{c}_{KG11},\overline{c}_{KG11},...,\underline{c}_{KG1L},\overline{c}_{KG1L},...,\underline{c}_{KGM_t1},\overline{c}_{KGM_t1},...,\underline{c}_{KGM_tL},\overline{c}_{KGM_tL}]$$
$$\in\mathbb{C}^{Nx2KGM_tL}$$

여기서 $\underline{c}_{kgm_tl}, \overline{c}_{kgm_tl}$ 은 다시 아래와 같이 정의된다.

$$\underline{c}_{kgm_tl}=\underline{c}_{kgm_tl}(\tau_l)=(1-\delta_l)\underline{\eta}_{kgm_tl}(d_l)+\delta_l\underline{\eta}_{kgm_tl}(d_l+1) \quad (5)$$

$$\overline{c}_{kgm_tl}=\overline{c}_{kgm_tl}(\tau_l)=(1-\delta_l)\overline{\eta}_{kgm_tl}(d_l)+\delta_l\overline{\eta}_{kgm_tl}(d_l+1) \quad (6)$$

코드 벡터의 "early" and "late" 파트 η 은

$$\underline{\eta}_{kgm_tl}(d_l)=[s_k[N-d_l+1].....s_k[C]\,0...0]^T \quad (7)$$

$$\overline{\eta}_{kgm_tl}(d_l)=[0....0\,s_k[1].....s_k[C-d_l]]^T \quad (8)$$

식 (5)~(8) 은 비동기 칩 샘플링으로 인하여 발생한다. 그림4. 는 비동기 샘플링에 의하여 $(d_l+\delta)T_c$ 만큼의 전송지연을 보여주고 있고,

$$H=diag([h_{1111},h_{1111},...,h_{111L},h_{111L},...,h_{11M_t1},h_{11M_t1},...,h_{11M_tL},h_{11M_tL},...,$$
$$h_{KG11},h_{KG11},.....,h_{KG1L},h_{KG1L},.....,h_{KGM_t1},h_{KGM_t1},.....,h_{KGM_tL},h_{KGM_tL}]$$
$$\in\mathbb{C}^{2KGM_tLx2KGM_tL}$$

여기서 $diag$ 는 diagonal matrix를 나타낸다.

$$A=diag(\underline{a}\otimes\underline{b}),\ \underline{a}=(A_1,A_2,.....,A_K),\ \underline{b}=1_{1x2GM_tL}$$
$$\in\mathbb{C}^{2KGM_tLx2KGM_tL}$$

여기서 $\otimes$ 은 Kronecker product을 나타낸다.

$$\underline{b}=[b_{1,1,1,1},b_{1,G+1,1,1},b_{1,1,1,1},b_{1,G+1,2,1},b_{1,1,1,2},b_{1,G+1,1,2},b_{1,1,2,2},b_{1,G+1,2,2},...$$
$$b_{K,G,1,1},b_{K,G+G,1,1},b_{K,G,1,1},b_{K,G+G,2,1},b_{K,G,1,2},b_{K,G+G,1,2},b_{K,G,2,2},b_{K,G+G,2,2}]^T$$
$$\in\mathbb{C}^{2KGM_tLx1}$$

여기서 b_{k,g,m_tl} 은 k 번째 사용자의 g 번째 부 전송열의 m_t 번째 다이버시티의 l 번째 다중 경로를 통하여 전송 되는 데이터

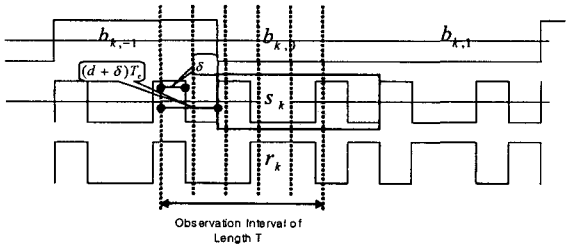

그림 4. 코드 비동기 샘플링 타이밍

b_k : bits of user k , r_k : received sequence of user k

s_k : spreading sequence of user k

이다.

III. 코드 성능 향상 기법

다중 안테나 시스템에서 송신 안테나와 수신 안테나의 상호 위치에 따라서 수신단에 입력되는 수신 신호의 도착 시간이 다르고 신호의 전송 지연에 의하여 발생된 수신 신호의 비동기 샘플링은 항상 인접한 두 개의 칩을 포함하게 되고 이런 인접한 신호의 평균은 신호의 고주파 성분을 열화 시켜서 결과적으로 $0.5T_c$ 만큼 불일치 되었을 때 최대 3 dB 신호 감쇄가 발생한다.[3](그림4.) 또한 한 안테나의 송신 신호 출력은 안테나에 비례해서 감소하고 특정 사용자를 위하여 사용되는 파일롯 채널의 확산 코드 수는 GM_t/M 만큼 증가하여 내부 채널 간섭이 증가하여 수신 신호의 감쇄 현상이 발생한다. 이러한 코드간의 간섭을 해결하기 위하여 각 안테나 별로 서로 다른 코드로 확산된 파일롯을 모든 송신 안테나에서 전송하는 것이 아니라 채널 환경에 따라서 일정한 시간 간격을 두고 송신 안테나를 호핑(Hopping) 시키면서 하나의 송신 안테나에서만 파일롯 데이터를 전송 하는 기법을 제안한다. 제안된 기법의 호핑 구조를 4개의 송신 안테나에 대해 나타내면 그림2와 같다. 방법을 구체적으로 구현하기 위해서는 그림2와 같은 환경 조건하에서 그림5와 같은 형태의 파일롯 채널 송신 데이터 구조를 구성한다. 그림5에서 t1,t2,t3,t4 는 전송 심볼 시간을 나타내고 열 방향은 4x4 다중안테나, 다이버시티 차수가 2 일 때 안테나와 전송열과의 관계를 고려한(1) 전송 신호의 테이블이다. 여기서 화살표는 각 전송신호 마다 출력되는 해당 안테나를 나타내며 사선으로 짙게 표현된 부분은 모두 "1"의 값이 전송 되는 부분이고 나머지 부분의 데이터는 전송 되지 않는 영역을 나타낸다. 각 송신 안테나상에서 동일 한 확산 코드를 가지고 그림5.에서와 같은 테이블 구조를 갖는 파일롯 데이터를 확산시키면 각 채널마다 시간적 선택성을 갖고 파일롯 신호가 전송되는 효과를 얻을 수 있다. 안테나상을 호핑하는

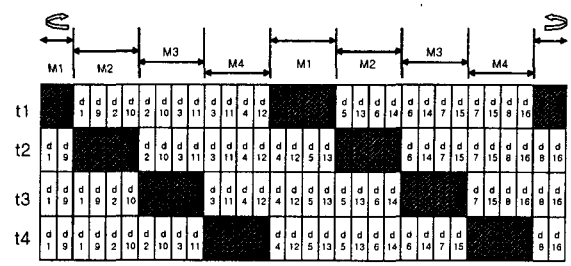

그림 5. 파일롯 채널 데이터 호핑 구조

주기는

$$Hop_{cycle} = CT_h / M \quad (9)$$

여기서 Hop_{cycle} 은 파일롯 데이터가 같은 안테나상에서 전송되는 시간이고 CT_h 은 채널의 상관시간이다.

IV. 모의 실험 결과

본 논문에서 제안한 파일롯 전송 기법의 성능을 분석하기 위해 적용된 실험 환경으로 동일한 크기의 송신 안테나 출력 및 다중 코드를 사용하는 MIMO CDMA 시스템의 순방향 링크를 구성하였다. 4개의 송신 안테나와 4개의 수신 안테나에 대한 MIMO 시스템을 가정하고, 안테나간의 거리는 채널 공간 상관이 없기에 충분한 거리인 2λ , 반송파 주파수 f_c =0.9GHz, 이동 속도 v =50km/h, 데이터 전송율 f_d =16kbit/s 일 때 약 40 심벌구간의 상관지연시간(τ_{max})을 갖는 Rayleigh 페이딩 채널 환경에서 실험을 진행 하였다. 실험에서 사용자 수 K =10, 파일롯 채널에 사용되는 데이터 $b_{k,g}$ =1, 정합필터의 출력단에서 신호 대 잡음 비율 10 dB , 사용된 확산 코드는 N =64의 Gold 코드, 사용된 전송 지연 예측 기법은 DC-MF(Differential Correlation Matched Filter)[4]이고 제안된 기법의 코드동기 성능을 평가하기 위해 코드동기 확률(Probability of acquisition), 실험적으로 코드 동기는 하나의 수신 안테나로 입력되는 M개의 채널의 전송 지연 값의 평균을 τ_{mean} 라고 정의 할 때 $|\tau_{mean} - \hat{\tau}_{mean}| < 0.5T_c$ 이 된다. 코드 동기에 필요한 평균시간을 의미하는 평균동기시간(Mean Acquisition Time), 여기서 T_p 는 코드 동기가 실패 하였을 경우 추가로 필요한 신호를 요구하는데 걸리는 시간[4], 코드 동기의 정확성을 나타내는 RMSE(Root Mean Square Error) 값을 사용 하였고[4], 또한 공간 다중화된 신호를 검출하기 위하여 V-BLAST(Decorrelating Decision Feedback) 기법을 사용 하였다.[2] 본 실험에서는 제안된 기법의 성능을 평가하기 위하여 각 송신 안테나에서 동시에 다른 확산 코드를 사용해서 데이터를 전송하는 방법과 코드동기 검출 성능을 비교 분석 하였다. 그림 6,7,9는 시변 Rayleigh 페이딩 채널에서의

코드동기 성능을 나타내다. 그림6.은 도착 신호 차이분포에 따른 코드 동기 확률을 나타내고 채널간의 도착 지연 차이가 커질수록 코드 동기 확률이 떨어 짐을 알수 있고 호핑 기법이 모든 조건에서 비 호핑 방법보다 성능이 향상 됨을 알 수 있다. 그 이유는 파일롯 채널을 위한 확산 코드를 시간적 선택성을 이용하여 하나만 사용하기 때문에 코드간의 직교성이 비 호핑 방법보다 우수 하기 때문이다. 성능 개선이 크게 향상 되지 않은 이유는 송신단의 전송 시점을 알 수 없어서 수신단에서는 시간 선택적으로 분리된 채널을 각각 프로세싱 할 수 없기 때문이다. 그림7.은 기존 방법과 제안된 방법의 평균동기시간을, 그림8.은 코드 동기의 정확도를 나타내고 역시 호핑 방법이 비호핑 방법보다 우수한 성능을 보여 주고 있다. 그림9.은 도착 지연 차이에 따른 BER 성능을 나타낸다. 하나의 확산 코드를 시간 선택적으로 이용하여 채널 예측을 해도 동시에 모든 채널에 다른 코드를 사용하여 채널 예측을 했을 때와 검파 성능면에서 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.

V. 결 론

다중 안테나를 사용하는 MIMO CDMA 시스템의 하향링크 시스템에서 파일롯 채널을 위한 확산 코드를 하나만 이용하여 시간 선택적으로 전송(Hopping)하는 기법이 송신 안테나 수 만큼의 확산 코드를 이용하여 동시에 전송하는 기법보다 코드 동기 성능 측면에서 우수 함을 실험을 통하여 확인 하였다. 그리고 호핑 기법의 검파 성능도 비호핑 기법의 성능과 거의 같은 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 특히 다중 안테나의 수가 증가하여 할당해야만 하는 파일롯 채널 코드수가 증가 하면 제안된 기법이 더욱더 우수한 코드 동기 특성을 나타낸다. 또한 제안된 기법이 MIMO CDMA 시스템에서 파일롯 채널 전송 방법을 위하여 사용 될 수 있는 효과적인 결과를 보여 주고 있다.

VI. 참고문헌

[1] G. Foschini, "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multiple Antennas", Bell Laboratories Technical Journal, Vol. 1, No.2, Autumn, 1996, pp 41-59

[2] Howard Huang, "Multiple Antennas in Cellular CDMA Systems : Transmission, Detection, and Spectral Efficiency", IEEE Trans. Wireless Commun. Vol.1, No.3, July 2002

[3] Stephen E. Bensley and Behhnaam Aazhang, "Subspace-Based Channel Estimation for Code Division Multiple Access Communication Systems", IEEE Trans, Commun, Vol, 44, No. 8, August 1996

[4] Tapani Ristaniemi and Jyrki Joutsensalo, "Code Timing Acquisition for DS-CDMA in Fading Channels by Differential Correlations", IEEE Trans, Commun, VOL.49,NO.5,May 2001

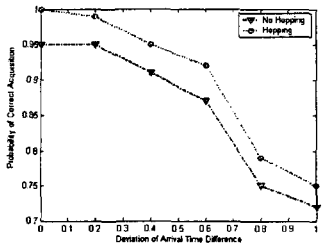

그림 6. Probability of acquisition as s function of arrival time difference.

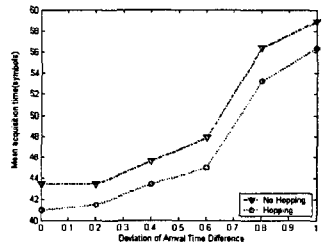

그림 7. Mean acquisition time as a function of arrival time difference. In case T_p =5

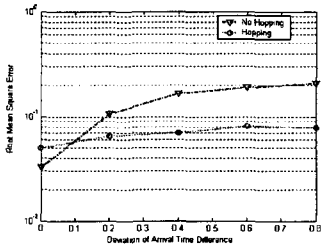

그림 8. RMSE as a function of arrival time difference

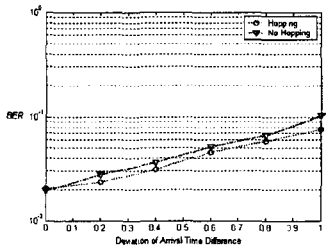

그림 9. BER as a function of arrival time difference