

DS-CDMA 하향링크에서 선형등화기를 이용한 단일사용자 수신기에 관한 연구

강준호^{*} · 남옥우^{*} · 김재형^{*}
^{*}창원대학교

A research of Single-User Detector using Linear Equalizer in DS-CDMA Downlink

Jun-ho Kang^{*} · Ock-woo Nam^{*} · Jae-hyung Kim^{*}

^{*}Changwon National University

E-mail : daumland@hanmail.net

요 약

본 논문에서는 DS-CDMA 하향링크에 적용할 수 있는 단일사용자 수신기에 관하여 연구하였다. DS-CDMA 하향링크에서는 주로 Walsh 부호를 사용하는데 다중경로 페이딩(multipath fading)에 의한 다중접속간섭(MAI)에 의하여 확산부호의 직교성을 잃게 된다. 본 논문에서는 선형 채널 등화기를 통하여 다중경로 페이딩 채널을 등화 시킴으로써 직교부호의 직교성을 복구한 후 부호-정합 필터(code-matched filter)를 통해 데이터를 복조하였다. 기존의 연구는 주로 이상적인 채널정보를 가정하였는데 본 논문에서는 채널추정을 위하여 파일럿 채널을 사용하였다. 특히 채널 추정의 정확도를 높이기 위하여 사용자 신호에 주기적으로 보호심볼을 삽입함으로써 이상적인 채널정보와 큰 차이가 없게 하였다. 성능분석결과 기존의 RAKE 수신기보다 성능이 뛰어났으며 특히 사용자가 많을 경우에도 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we study single-user receiver, which applicable to DS-CDMA downlink. DS-CDMA downlink mainly use Walsh code, its orthogonality may be lost by the multiple access interference(MAI) caused by the multipath channel. In this paper, we use linear channel equalizer to eliminate the interference due to multipath channel and then to recover orthogonality and use code-matched filter to detect transmitted data. Unlike existing research, which mainly assumed ideal channel information, we use pilot channel to estimate the channel coefficients. Especially we use guard symbols which are inserted periodically to estimate channel coefficients exactly without interference from user signal, and we accept an approximately ideal. The results show that improvement can be achieved using proposed detectors compared with that of the conventional RAKE receiver, especially when the user population is high we accept excellent performance improvement.

1. 서 론

현재 상용화 표준인 IS-95의 하향링크에서는, 사용자들이 직교확산부호(orthogonal spreading codes)에 의해 다중화(multiplexing)되고 있다. 그러나 다중경로 전파(multipath propagation)와 주파수-선택적 페이딩(frequency-selective fading)에

의해, 사용자 부호들간의 직교성이 깨어지게 되고 다중접속간섭(multiple access interference)에 의해 수신기의 성능이 크게 열화 된다. 이러한 MAI를 제거하기 위한 방법으로 stochastic gradient methods 나 minimum mean-squared-error (MMSE) criterion에 기초한 여러 가지의 적응 알고리즘이 제안되었다.[1-5].

지금까지 제안된 알고리즘들은 주로 상향링크에 대한 것이었다. 하향링크의 경우는 상향링크의 특수한 경우로 볼 수 있기 때문에 상향링크에 대한 복조 알고리즘을 하향링크에 적용할 수 있고 다음과 같은 하향링크의 독특한 특성 때문에 하향링크에만 적용할 수 있는 특수한 알고리즘의 개발이 가능하다.[6-10]

- 하향링크에서는 상향링크와는 반대로 동일한 채널을 통하여 전송된 모든 K 명의 사용자 신호가 이동국(mobile station)에 나타난다.
- 하향링크의 경우에는 기지국으로부터 다른 이동국으로 전송하는데 사용된 사용자 부호를 개개의 이동국에서 사전에 알지 못하고, 단지 사용자 자신의 부호만을 이용하여 데이터가 검파된다.
- 이동국에서 복조 알고리즘을 단순하게 설계해야 단말기를 소형 경량으로 할 수 있고 전력소비도 작다.

본 논문에서는 하향링크에 적용할 수 있는 특수한 알고리즘으로 ZF criterion 과 MMSE criterion 에 기초한 선형 채널 등화기를 이용한 단일 사용자 수신기에 대하여 연구하였다. 선형 채널 등화기를 이용하여 다중 경로 페이딩 채널을 등화시킨 후 MAI가 제거된 상태 하에서 부호-정합 필터를 통해 데이터를 복조하였다. 채널 추정을 위한 방법으로는 파일럿 채널을 사용하였으며 사용자 신호에 주기적으로 보호 심볼을 둬으로써 채널 추정의 정확도를 높이고 동시에 채널 등화기의 길이를 짧게 하여 계산상의 복잡성을 줄였다. 또한 파일럿 채널의 전력 최적화를 통하여 채널 추정의 정확도를 높였다.

본 논문구성은 다음과 같다. II장에서 하향링크의 수신신호 모델을 설명하고, III장에서 제안된 적응형 단일사용자 수신기 구조 중 파일럿채널을 이용한 채널추정기와 다중경로 채널 등화기 그리고 데이터 복조방법에 대해서 설명한다. 다중채널 등화기와 제안된 단일 사용자 수신기에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 IV장에서 제시하고, V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 하향링크 수신신호 모델

그림 1은 CDMA 시스템의 하향링크 수신신호 모델을 나타낸 것이다.

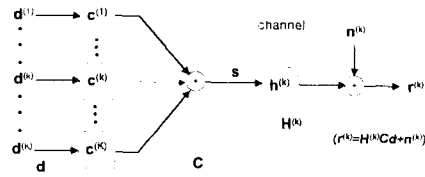


그림 1. CDMA 시스템의 하향링크 모델

여기서 $\mathbf{d}^{(k)}, k=1...K$ 는 k 번째 사용자에게 의해 전송된 데이터 벡터로써 $d \in \{+1, -1\}$ 이며 K 는 사용자수를 나타낸다. 따라서

$$\mathbf{d} = (\mathbf{d}^{(1)T}, \mathbf{d}^{(2)T}, \dots, \mathbf{d}^{(K)T})^T \quad (1)$$

이다.

$\mathbf{c}^{(k)}, k=1...K$ 는 사용자 k 의 확산부호로써 $c \in \{+1, -1\}$ 이며

$$\mathbf{C} = [\mathbf{c}_0^{(k)}, \mathbf{c}_1^{(k)}, \dots, \mathbf{c}_{Q-1}^{(k)}]^T \quad (2)$$

이다. 즉, \mathbf{C} 는 $(NQ) \times (KN)$ 의 크기를 가지는 행렬로써, N 은 데이터 블록의 길이, Q 는 확산계수를 의미한다.

\mathbf{h} 는 채널 임펄스응답을 나타내는 행렬이며, k 번째 사용자의 채널 임펄스응답을 $\mathbf{h}^{(k)}$ 라 표현하면

$$\mathbf{h}^{(k)} = [h_0, h_1, \dots, h_{W-1}]^T \quad (3)$$

이다. 여기서 W 는 칩주기로 주어지는 최대 다중경로 지연시간을 의미한다. 하향링크의 경우 모든 사용자 신호는 동일한 채널을 경험하기 때문에 $\mathbf{h}^{(k)} = \mathbf{h}$ 라 둘 수 있다. 즉 $\mathbf{H}^{(k)}$ 는 $(NQ+W-1) \times (NQ)$ 의 크기를 가지는 행렬로써

$$\mathbf{H}^{(k)} = (\mathbf{H}_{i,j}^{(k)}); i=1, \dots, NQ+W-1, j=1, \dots, NQ \quad (4)$$

이다.

결과적으로 수신된 벡터는

$$\mathbf{r}^{(k)} = \mathbf{H}^{(k)}\mathbf{C}\mathbf{d} + \mathbf{n}^{(k)} = \mathbf{H}^{(k)}\mathbf{s} + \mathbf{n}^{(k)} \quad (5)$$

으로 표현될 수 있다. 단, $\mathbf{s} = \mathbf{C}\mathbf{d}$ 이다.

III. 제안된 적응형 단일사용자 수신기

그림 2는 제안된 다중경로 채널 등화기를 이용한 적응형 단일 사용자 수신기의 블록도를 나타낸 것이다.

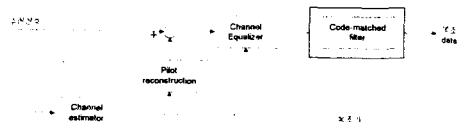


그림 2 다중경로 채널 등화기를 이용한 단일사용자 수신기의 블록도

1. 파일럿 채널을 이용한 채널추정기

다중경로 페이딩의 경우, 채널의 임펄스응답은 시변적이며 파일럿 신호를 이용하여 수신기에서 추정이 가능하다. 파일럿 신호는 수신신호에 주기적으로 삽입하는 다중화방식과 별도의 파일럿채널을 사용하는 파일럿 채널방식을 들 수 있는데, DS/SS의 하향링크의 경우 별도의 파일럿 신호를 병렬로 전송하는 파일럿 채널 방식이 매우 효과적이다.

전송 데이터들은 J개의 심볼을 갖는 블록으로 나누어 진다. 편의상 모든 파일럿 심볼이 +1의 값을 가진다고 가정하면, 채널 추정기는 채널이득에 대한 추정값을 만들어 내고 이 채널 추정값에 대한 시퀀스가 데이터 블록구간에서의 페이딩 이득을 얻기위하여 보간된다.

그림 3 는 보호심볼 구간에서의 수신신호 구조를 보여준 것이다.

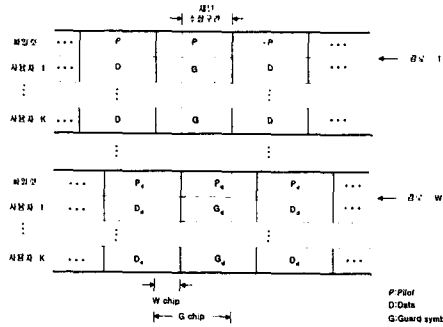


그림 3 보호심볼 구간에서의 수신신호 구조

그림에서 볼 수 있듯이 채널추정 구간(G-W)에서는 사용자 신호에 의한 간섭이 존재하지 않으므로 RAKE수신기 형태의 채널 추정기를 이용하여 상관시킨 채널 추정기의 출력은

$$\hat{\mathbf{g}} = \mathbf{C}_p \mathbf{g} + \mathbf{n}_p \tag{6}$$

이다. 여기서 $\hat{\mathbf{g}}$ 는 보호심볼 구간에서의 채널추정 벡터로 $\hat{\mathbf{g}} = [\hat{g}_1, \dots, \hat{g}_W]^T$ 이고, \mathbf{g} 는 보호심볼 구간내의 채널추정 구간에서의 채널계수벡터로 $\mathbf{g} = [g_1, \dots, g_W]^T$ 이다. 단, W는 분리된 다중경로의 개수를 나타내고 \mathbf{n}_p 는 분산이 σ_n^2 인 부가성 잡음 벡터를 의미한다. 그리고 \mathbf{C}_p 는 채널추정 구간에 포함된 파일럿 채널 확산부호의 부분 상관계수 행렬이다. $\hat{\mathbf{g}}$ 에는 다중경로 페이딩에 의한 경로간 간섭신호가 포함되어 있으며 역상관기

(decorrelator)를 이용하여 경로간 간섭을 제거시킨다. 즉, 경로간 간섭이 제거된 채널 추정값은 $\mathbf{Z} = \mathbf{C}_p^{-1} \hat{\mathbf{g}} = \mathbf{g} + \mathbf{C}_p^{-1} \mathbf{n}_p$ (7)

에 의하여 얻을 수 있으며 (W×W)의 크기를 가지는 부분상관행렬 \mathbf{C}_p 는 사용자가 쉽게 계산이 가능하다.

보호구간에서의 추정된 채널계수는 MMSE-보간기에 의하여 다른 구간에서의 채널계수들을 계산한다. 즉, n번째 프레임에서 채널이득의 추정치들은

$$\hat{\mathbf{H}}[n] = \mathbf{W} \cdot \mathbf{Z}[n] \tag{8}$$

으로 보간된다. 여기서

$$\hat{\mathbf{H}}[n] = \left(\hat{\mathbf{h}}[1], \hat{\mathbf{h}}[2], \dots, \hat{\mathbf{h}}[p] \right)^T$$

는 n번째 블록에서의 페이딩 이득에 대한 보간기 출력이며, \mathbf{W} 는 (p×J)의 크기를 가지는 보간기 이고 $\mathbf{Z}[n]$ 은 (J×1)의 크기를 가지는 보간기 입력벡터이다. 단, $p = NQ + W - 1$ 이다.

2. 다중경로 채널 등화기

수신된 벡터 $\mathbf{r}^{(k)}$ 가 채널 등화기에 입력되어 s의 추정치 $\hat{s}^{(k)}$ 이 출력된다. 편의상 잡음벡터의 공분산 행렬 \mathbf{R}_n 을 $\sigma^2 \mathbf{I}$, 데이터 벡터와 공분산 행렬 \mathbf{R}_d 를 \mathbf{I} 라 두면 s의 추정치는 다음과 같이 표현될 수 있다. 즉,

$$\hat{s}^{(k)} = \hat{\mathbf{H}}^{(k)} \mathbf{r}^{(k)} \tag{9}$$

이다. 단, \mathbf{I} 는 단위행렬이고, σ^2 은 잡음의 분산이며 $\hat{\mathbf{H}}^{(k)}$ 은 Zero Forcing(이하 ZF) 또는 MMSE criterion에 의하여 설계가 가능하다. 먼저, ZF criterion을 이용할 경우 s의 추정치는

$$\hat{s}_{zf}^{(k)} = \left(\mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{H}^{(k)} \right)^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{r}^{(k)} \tag{10}$$

이다. 여기서 $()^T$ 는 전치행렬을 나타내고, $()^{-1}$ 는 복소수의 공액값을 나타낸다. 또한 MMSE criterion에 의한 s의 추정치는

$$\hat{s}_{mmse}^{(k)} = \left(\mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{H}^{(k)} + \sigma^2 \mathbf{R}_n^{-1} \right)^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{r}^{(k)} \tag{11}$$

로 주어진다. 여기서 \mathbf{R}_n 은 (NQ)×(NQ)의 행렬로써 s의 공분산 행렬이다.

3. 부호-정합 필터에 의한 데이터 복조

하향링크 데이터 복조는 관심이 있는 k번째 사용자에게 관련된 출력 $\mathbf{d}^{(k)}$ 만을 처리한다. 채널등

화기로부터 $\hat{s}^{(k)}$ 이 출력되면 부호-정합 필터 또는 적응형 부호-정합 필터에 의하여 $\mathbf{d}^{(k)}$ 의 복조값 $\hat{\mathbf{d}}^{(k)}$ 을 출력한다. 먼저 ZF 블록 선형등화기에 의한 $\mathbf{d}^{(k)}$ 의 추정치는

$$\mathbf{d}_{ZF}^{(k)} = \mathbf{C}^{(k)T} \left(\mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{H}^{(k)} \right)^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{r}^{(k)} \quad (12)$$

로 표현되며, MMSE 블록 등화기에 의한 $\mathbf{d}^{(k)}$ 의 추정치는

$$\mathbf{d}_{mmse}^{(k)} = \mathbf{C}^{(k)T} \left(\mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{H}^{(k)} + \sigma^2 \mathbf{R}_s^{-1} \right)^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{r}^{(k)} \quad (13)$$

로 표현된다.

식(13)에서 볼 수 있듯이 MMSE 블록 등화기의 경우 공분산 행렬 \mathbf{R}_s 는 사용자 k 와 부호 $\mathbf{c}^{(k)}$, $k=1 \dots K$ 에 의존하기 때문에 사용자가 전송을 시작하고 멈춤에 따라 새로 계산되어야 한다. 여기서 공분산 \mathbf{R}_s 는 band 구조이고 블록구조이며 Hermitian 행렬인데 만약 특별한 경우로 모든 $n=1 \dots K$, $k=1 \dots K$ 에 대하여 $E\left[|\mathbf{d}^{(k)}|^2\right]$ 이 1

이고, 모든 $q=1 \dots Q$, $k=1 \dots K$ 에 대하여 $|\mathbf{c}^{(k)}|^2$ 이 1이라면 \mathbf{R}_s 의 모든 대각 요소는 K 가 되고 Q^{-1} 개의 대각 요소들의 절대값은 0이 아닌 K 보다 작은 값을 가진다. 따라서 \mathbf{R}_s 에 대한 역변환이 대단히 어렵기 때문에 \mathbf{R}_s 를 다음과 같이 근사적으로 계산하는 것이 바람직하다. 즉, $\mathbf{R}_s \approx K\mathbf{I}$ 임을 고려하면 MMSE 블록 등화기에 의한 데이터 복조는

$$\hat{\mathbf{d}}_{mmse}^{(k)} = \mathbf{C}^{(k)T} \left(\mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{H}^{(k)} + \frac{\sigma^2}{K} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \mathbf{r}^{(k)} \quad (14)$$

와 같이 된다.

그림 4는 부호-정합 필터를 이용한 수신기의 블록도를 나타낸 것이다.

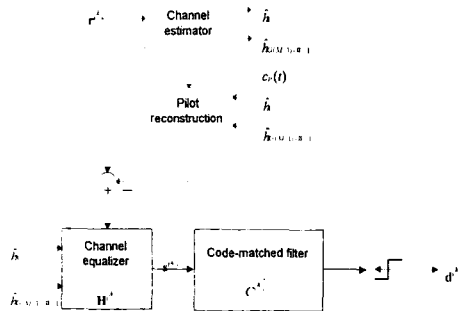


그림 4 부호-정합 필터를 이용한 수신기의 블록도

IV. 성능 평가

본 절에서는 다중 경로 채널 등화기와 제안된 단일 사용자 수신기의 성능에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 채널 등화기는 Zero Forcing 등화기 및 MMSE 등화기를 고려하였고, 데이터 복조기로는 부호-정합 필터방식의 수신기를 고려하여 성능을 비교하였다. 성능분석에 사용된 수신기는 아래와 같고 사용자 수 및 SNR에 따라 비교하였다.

- ZF 채널 등화기 / 부호-정합 필터 수신기 (ZF-MF)
- MMSE 채널 등화기 / 부호-정합 필터 수신기 (MMSE-MF)

시뮬레이션을 수행하는데 가정한 조건은 다음과 같다.

- 동등한 전력을 가지는 2 경로 페이딩 채널
- 정규화된 최대 페이드율 $f_d \cdot T$ 는 0.01
- 최대 경로 지연은 칩 주기 단위로 10칩 이내
- 주기가 32인 Walsh 부호를 PN부호로 사용
- 보호심볼 삽입주기 = 5

먼저 그림 5는 이상적인 채널 정보를 이용할 경우 ZF-MF, MMSE-MF 수신기의 BER 성능에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준 것이다(이하 그림 5, 6, 7, 8에서 X축은 Average Eb/No [dB]이고 Y축은 BER이다). 채널 등화기를 적용시키는 데이터 블록의 길이는 4심볼(N=5), 정규화된 도플러 주파수 $f_d \cdot T = 0.01$ 을 가정하였다.

ZF-MF의 경우 사용자 수의 변화에 따른 수신기의 성능차이가 거의 없었으며 MMSE-MF의 경우 ZF-MF보다 훨씬 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있다.

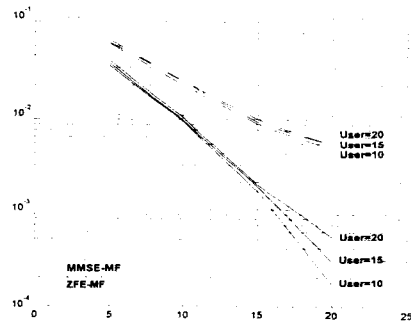


그림 5 이상적인 채널 정보에서의 수신기의 성능평가

그림 6 은 설계된 채널 추정기를 적용하여 ZF-MF, MMSE-MF 수신기의 성능을 비교한 결과이다.

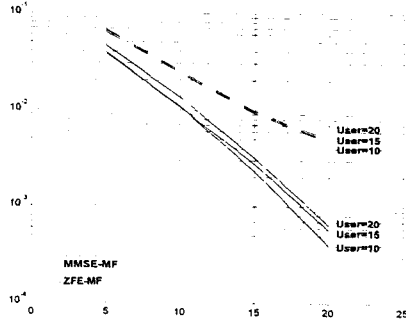


그림 6 채널 추정기를 적용한 수신기의 성능평가

MMSE-MF 수신기의 경우 ZF-MF 수신기를 사용한 경우보다 매우 우수한 성능을 보이고 있으며 특히 사용자수가 확산이득 $G(=32)$ 의 $1/2$ 이상에서 뛰어난 성능을 보이고 있다.

그림 7은 RAKE수신기의 각 가지에 MMSE를 적용한 MMSE-RAKE 수신기와 MMSE-MF 수신기의 성능을 이상적인 채널정보를 가정하여 비교한 결과이다.

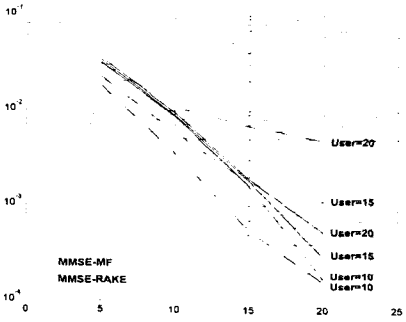


그림 7 MMSE-RAKE 수신기와 MMSE-MF 수신기의 성능비교 ($f_d \cdot T = 0.01$, 이상적인 채널정보)

사용자 수가 20명일 경우 MMSE-MF 수신기의 성능이 MMSE-RAKE 수신기에 비해서 크게 개선됨을 볼 수 있다. 또한 MMSE-MF 수신기의 성능은 사용자수에 크게 의존하지 않음을 역시 알 수 있다.

마지막으로 그림 8 에서 Markku J. Heikkilä가 제안한 적응형 단일 사용자 수신기[9]와 본 논문에서 제안한 MMSE-MF 와의 성능 비교 결과를 제시한다.

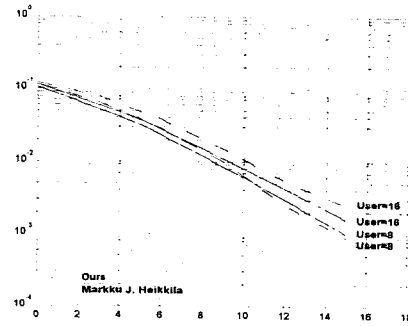


그림 8 Heikkilä의 수신기와 MMSE-MF 수신기의 성능비교

Heikkilä 수신기의 경우 동등한 전력을 가지는 3개의 경로로 구성된 다중경로 페이딩 환경의 가정하에서 적응형 채널 등화기를 사용하여 G 가 32인 Walsh 부호의 직교성을 복원한 후 기존의 부호-정합 필터를 사용하여 데이터를 복조하였다. 성능비교결과 사용자가 확산계수 $G(=32)$ 의 $1/2$ 이상이 되면 본 논문에서 제안된 MMSE-MF가 약 1 dB이상의 성능향상을 보임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 DS-CDMA 하향링크에 적용할 수 있는 단일사용자 수신기에 관하여 연구하였다. DS-CDMA 하향링크에서는 주로 Walsh 부호를 사용하는데 다중경로 페이딩(multipath fading)에 의한 다중접속간섭(MAI)에 의하여 확산부호의 직교성이 깨어지게 된다. 본 논문에서는 선형 채널 등화기를 통하여 다중경로 페이딩 채널을 등화 시킴으로써 직교부호의 직교성을 복구한 후 부호-정합 필터(code-matched filter)를 통해 데이터를 복조하였다. 기존의 연구는 주로 이상적인 채널정보를 가정하였는데 본 논문에서는 채널추정을 위하여 파일럿 채널을 사용하였다. 특히 채널 추정의 정확도를 높이기 위하여 사용자 신호에 주기적으로 보호심볼을 삽입함으로써 이상적인 채널정보와 큰 차이가 없게 하였다.

성능 분석결과 채널 등화기에 의하여 다중 경로 페이딩 효과를 제거 시킨후 부호-정합 필터를 사용하여 데이터를 복조할 경우 MMSE-MF 수신기가 ZF-MF 수신기보다 성능이 훨씬 뛰어났으며, 기존의 MMSE-RAKE 수신기와 비교했을 경우 사용자수가 확산계수의 $2/3$ 이상에서 MMSE-MF 수신기가 훨씬 뛰어난 성능을 보였다. Heikkilä 수신기와 비교했을 경우에도 사용자 수가 확산계수의 $1/2$ 이상일 경우에 성능이 우월함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] S.L. Miller, "An Adaptive Direct-Sequence code-Division Multiple Access Receiver for Multiuser Interference Rejection", IEEE transactions on Communications, vol.43, pp. 1746-1775, Feb.-Apr. 1995
- [2] M.Latva-aho, "Advanced receivers for wideband CDMA systems", Doctoral thesis, Department of Electrical Engineering, University of Oulu, Finland 1998
- [3] M.L. Honig, U. Madhow and S. Verdú, "Blind adaptive multiuser detection", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 41, pp.944-960, July 1995
- [4] N. Zecevic and J. H. Reed, "Blind adaptation algorithms for direct-sequence spread-spectrum CDMA single-user detection", IEEE International Vehicular Technology Conference, VTC'97, May 1997, pp.2133-2137
- [5] P. Komulainen, Y. Bar-Ness and J. Lilleberg, "Simplified bootstrap adaptive decorrelator for CDMA downlink", IEEE International Conference on Communications, ICC'98 Atlanta, USA, June 1998, pp.380-384
- [6] Matti Latva-aho, "Modified LMMSE Receiver for DS-CDMA-Part I; Performance Analysis and Adaptive Implementations", Proceedings of ISSSTA98 conference, Vol. 2, pp.652-662, Sun city, South Africa, 1998.
- [7] Kemin Li and Hui Liu, "Blind Channel Equalization for CDMA Forward Link", Proceedings of VTC 1999-Fall, Vol.4, pp.2353-2357, Amsterdam, The Netherlands, 1999.
- [8] Stefan Werner and Jorma Lilleberg, "Downlink channel decorrelation in CDMA systems with long codes", Proceedings of VTC'99 Vol. 2, pp.1614-1617, Hoston, USA, 1999.
- [9] Markku J. Heikkilä, "Adaptive channel equalization", Proceedings of VTC 1999-Fall Vol.2, pp. 978-982, Amsterdam, The Netherlands, 1999
- [10] Petri Komulainen and Markku J. Heikkilä, "Adaptive channel equalization based on chip separation for CDMA downlink", PIMRC'99 Vol.3, pp.1114-1118, Osaka, Japna, 1999
- [11] Matti Latva-aho, Markku Juntti and Ian Oppermann, "reconfigurable Adaptive RAKE receiver for Wideband CDMA Systems", Proceedings of VTC'98, Vol.III, pp.1740-1744, Ottawa, Canada, 1998.
- [12] John G. Proakis, "Digital Communications-third edition", McGraw-Hill,Inc., 1995.
- [13] S.Verdu, "Multiuser Detection", Cambridge University Press, 1998