

## MMSE 다중사용자 검출기의 성능 향상에 관한 연구

유 동 관\*

### A Study on performance improvement of MMSE Multi-User Detector

Dong Kwan Yoo \*

#### 요 약

본 논문은 STBC CDMA 시스템의 다중 사용자 환경에서 기존 MMSE 검출 방식이 여러 경로의 수신신호 중에서 가장 전력이 강한 신호만을 사용하므로 상대적으로 검출 능력이 떨어지는 단점이 있어 이를 보완하고자 각각의 수신 신호에 동일이득(Equal gain)과 비례이득(Proportional gain)이 여러가지 형태로 조합된 다중경로 이득(Multi-Path gain)을 적용시켜 성능을 개선시킨 다음에 이것의 성능을 기존의 MMSE 검출기의 성능과 비교 분석하여 보았다. 개선된 검출방식의 성능분석은 비트 오류 확률분포 관점에서 이루어졌으며 이것을 기존의 MMSE 방식과 비교한 결과 여러가지 형태로 조합된 다중경로 이득을 적용시켜 성능을 개선시킨 검출 방식이 기존의 방식보다 채널의 지연 값, 사용자 수, 신호 대 잡음비에 대한 비트 오류 확률분포의 성능이 더 향상됨을 알 수 있었다.

#### Abstract

In this paper, an improved detection method is proposed by supplementing various types of Multi-Path gain for a MMSE Multi-User detector. This method is proposed to complement the shortcomings of the conventional detection method which is used for multiuser detection in STBC(Space-Time Block Code) CDMA system. We analyzed the improved method in bit error probability viewpoint and compared the result with that of the conventional method. In this result, we showed that the improved method obtains better performance of bit error probability than the conventional method when parameters such as delay, number of user and SNR are changed.

▶ Keyword : STBC CDMA , Multi-Path gain , MMSE Multi-User Detector

---

• 제1저자 : 유동관

• 접수일 : 2007.1.22, 심사일 : 2007.2.1, 심사완료일 : 2007. 3.14.

\* 동서울 대학 컴퓨터정보과 조교수

## I. 서론

최근 무선통신 환경은 음성 서비스를 비롯한 다양한 멀티미디어 서비스를 제공하고 고품질 및 고속 데이터 전송을 지원하는 모습으로 변하고 있다. 이와같은 데이터의 대용량화 및 고속 데이터 전송 서비스를 지원하는 차세대 무선 통신시스템은 현재 기술로써 제공할 수 있는 것보다 더 큰 용량의 무선자원과 고속의 전송률을 제공해야 될 것이다. 이를 위해 여러 분야의 연구가 진행되고 있으며 그 중에 다중 안테나와 채널 부호화를 사용하여 전송 다이버시티 (Diversity) 이득을 높여서 무선 이동통신의 페이딩 상황에서 기존의 통신 시스템에 비해 더 큰 전송 용량을 제공하는 시공간 부호화 (Space-Time Coding) 기법과 무선 이동통신에서 여러 명의 사용자 사이에서 발생하는 간섭을 제거하여 무선자원의 용량을 증가시켜서 성능을 개선시키는 다중사용자 검출(Multi-user detection) 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다.

시공간 부호화 기술은 여러 개의 송수신 안테나를 이용하여 공간 다이버시티와 부호화 방식을 결합함으로써 무선 이동통신 환경에서 뛰어난 성능을 구현하는 방법이다. 이 기술은 무선 통신 채널에서 다중 경로에 의한 페이딩 영향을 최소화시키기 위해 송수신 단의 안테나 배열을 통해 채널 상태에 관한 정보 없이도 다이버시티를 얻을 수 있게 하고 또한 송수신 단의 다중 안테나 사용을 통해 채널 용량을 증가시킨다. [1,2]

CDMA 시스템은 기지국과 단말의 상대적 거리에 따른 불균등한 수신 신호의 세기에 의해 시스템의 용량을 감소시키는 상호간섭을 많이 겪게된다. 이와 같은 다중접속 간섭의 제거를 위해 종래 방식인 IS-95 시스템에서는 모든 사용자의 신호전력 레벨을 동일하게 제어하는 전력제어 (Power control) 방식을 사용하였으나 이러한 전력제어만으로는 근본적인 확산 부호열 간의 상호상관 (Cross Correlation) 값에 의해 발생하는 간섭을 제거하는 것은 불가능하고 단지 그 영향을 최소화 할 뿐이다. 최근에는 이러한 다중접속 간섭 (Multiple Access Interference)의 영향을 줄이기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 적응 간섭 제거와 적응 배열 안테나를 사용하는 방식 등이 등장하였으나 이러한 감산 기반의 간섭제거 방식은 순방향 링크에 대한 경우에 시스템의 복잡도에 큰 영향을 주기 때문에 그대로 적용하는 것이 곤란하므로 순방향 링크에서 원하는 신호에 대한 정보만을 검출하면서 간단히 간섭을 제거할 수

있는 새로운 구조가 필요한데 이러한 조건을 만족시키기 위해 등장한 대표적인 것이 MMSE (Minimum Mean Square Error) 검출기이다. [3,4,5]

일반적으로 순방향 링크에서는 모든 사용자 신호는 동기 (synchronous) 모드로 전송되고, 사용자 구분 확산부호로는 각 부호열 상호간에 직교성을 가지는 왈쉬 부호열 (Walsh sequence)을 사용한다. 따라서 이론상으로는 각 사용자 신호는 부호열간에 직교성으로 인해 동일 셀 내에서의 간섭은 존재하지 않게 된다. 하지만 CDMA 통신시스템에서와 같이 전송대역이 넓은 경우 전송 채널의 물리적인 영향에 의해 전송신호는 다중경로 성분으로 수신되게 된다. 이러한 경우 각 경로의 신호는 서로 직교성을 잃게 되고 따라서 서로 간섭으로 영향을 미치게된다. 특히 IMT-2000에서 사용되는 W-CDMA (Wideband CDMA) 방식의 경우는 광대역으로 신호가 전송되므로 이러한 다중경로 성분의 영향은 더욱 커지게 되며 중요한 성능 제약 요인이 된다.

본 논문은 다중사용자 환경의 STBC CDMA 시스템에서 고속 데이터전송을 가능하게 하고 무선자원 용량을 증가시키기 위한 검출기법의 연구로 시공간 다이버시티 이득을 높이고 다중접속 간섭도 제거시키며 각각의 수신신호에 동일 이득과 비례이득이 여러 가지 형태로 조합된 다중경로이득 (Multi-Path gain)을 적용시켜 성능을 개선시킨 MMSE 검출기를 제안한다. 제안된 검출 방식은 여러 경로의 수신 신호 중에서 가장 전력이 강한 신호만을 사용하는 기존의 MMSE 검출 방식과 달리 각 경로에 대한 수신신호에 가중치 벡터  $w_l$ 을 이용하여 다중접속 간섭을 제거한 다음에 각 경로의 특성에 따른 다중경로이득 (Multi-Path gain)을 적용시키고 이러한 모든 경로에 대한 검출신호를 전부 결합하여 그것의 실수부를 취해서 최종 검출값을 결정하는 방식으로 동작한다. 제안된 검출기의 성능 분석은 비트오율 확률 분포 (Probability of Error)를 이용하여 이루어졌으며 기존의 MMSE 방식과 비교한 결과 제안한 검출기가 기존 방식보다 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

## II. 관련 연구

### 1. Space-Time Block Code

무선채널은 전달매질을 통해 다중경로로 전파되므로 이로 인한 신호 감쇠와 다른 사용자들 사이의 간섭 등이 통신 환경을 열악하게 만든다.

수신기는 이를 극복하기 위해서 다이버시티 기법을 사용하는 데, 이러한 다이버시티 기법으로는 시간 다이버시티(Temporal Diversity) 기법, 주파수 다이버시티(Frequency Diversity) 기법, 공간 다이버시티(Antenna Diversity) 기법 등이 있다.

최근에 다중 안테나와 채널 부호화를 사용하여 전송 다이버시티 (Diversity) 이득을 높여서 이동 통신의 페이딩 상황에서 기존의 통신시스템에 비해 더 높은 전송 용량을 제공하는 시공간 부호화 (Space-Time Coding) 기법이 등장하였다.[6,9,10]

시공간 블록 부호 (Space-Time Block Coding) 는 Alamouti에 의해 최초로 2X2 복소직교설계 (Complex Orthogonal Design)를 이용한 송신 다이버시티가 소개되었고, Tarokh에 의해 이를 일반화한 직교 설계이론 (Orthogonal Design Theory)에 따른 직교성을 갖는 부호어 행렬의 시공간 블록 부호가 제안되었다.

시공간 블록 부호는 상대적으로 부호화 이득은 작지만, 최대 다이버시티 차수를 가지면서 수신기에서 선형처리만으로 최대우도 (Maximum Likelihood)의 복호를 가능하게 하기 때문에, 수신기의 복잡도가 송신 안테나의 개수에 따라 선형적으로 증가하여 수신기의 구조를 간단하게 하는 장점을 가진다.

그림1은 시공간 블록 부호 (STBC) 시스템의 구성도이며 기본적인 동작은 다음과 같다.

그림에서 보듯이 데이터가 채널 부호화기 (Coder)로 입력되고 채널 부호화기 (Coder)의 출력 값은 변조 심벌 (Modulation Symbol) Mapper에 의해서 심벌을 비트로 바꾼다. 그 후 직교 심벌을 위한 Block Mapper를 통과시킴으로써 원하는 STBC (Space-Time Block Code)를 만들 수 있다. 이렇게 만들어진 STBC는 각각의 안테나를 통해 동시에 전송하게 된다.

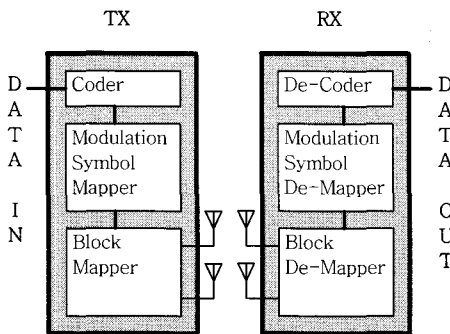


그림 1. 시공간 블록 부호화 시스템  
Fig. 1 Space-Time Block Code System

수신단의 처리는 송신단에서의 진행 과정과 반대로 Block De-Mapper 와 변조 심벌 (Modulation Symbol) De-Mapper를 통과한 후에 복호기 (De-Coder)를 통해 원래 신호로 복호된다.

## 2. MMSE 다중사용자 검출기

최근 CDMA 시스템에 대한 다중접속 간섭 (MAI : Multiple Access Interference)의 제거 및 여러 명의 사용자 사이에서 발생하는 간섭을 제거하여 무선 자원의 용량을 증가시켜서 성능을 개선시키는 다중사용자 검출 (Multi-user detection)에 관한 연구가 활발히 진행되고있다. 기존의 IS-95 시스템에서 다중 접속 간섭의 영향을 줄이기 위해 사용한 전력제어 (Power Control) 방식은 간섭의 완전한 제거는 불가능하고 단지 그 영향을 최소화할 뿐이며 감산기반의 간섭제거 방식도 순방향 링크에 적용할 경우에는 시스템의 복잡도에 큰 영향을 주기 때문에 그대로 적용하기 어려운 문제를 갖고 있어서 이러한 문제들을 해결하며 순방향 링크에서 원하는 신호에 대한 정보만을 검출하고 간섭을 간단히 제거할 수 있는 새로운 방식의 등장요 구되는데 이러한 조건을 만족시키는 것이 MMSE (Minimum Mean Square Error) 검출기이다.

다음의 그림2는 DS-CDMA시스템의 MMSE 검출기 모델을 나타낸 것이다.

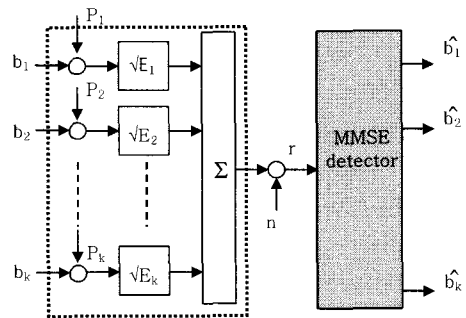


그림 2. MMSE 검출기모델  
Fig. 2 Model of MMSE Detector

위 그림2에서 MMSE 검출기로 입력되는 수신 신호 r은 데이터 심벌 b, 데이터 심벌을 전송하기 위한 확산 심벌 열 P, 데이터 심벌에 해당하는 수신 신호 전력 E, 잡음 n의 항을 통해 표현되는데 이것을 행렬과 벡터로 나타낸 것이 식(1)이다.

여기서 식(1)에 사용된 데이터 심벌  $b$ , 확산 심벌 열  $P$ , 수신신호 전력  $E$ 는 각각  $b = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_K)^T$ ,  $P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_K]$ ,  $E = \text{diag}(E_1 \ E_2 \ \dots \ E_K)$ 로 쓸 수 있다.

$$r = P * \sqrt{E} * b + n \dots\dots\dots (1)$$

MMSE 검출기는 수신단에서 수신 신호와 원하는 신호간의 MSE (Mean Square Error)를 최소화하도록 필터 계수를 조절하는 검출기로 만약  $k$ 번째 사용자의 데이터 심벌  $b_k$ 를 검출하는 경우라면 MMSE 검출기는 수신신호  $r$ 로부터 검출 출력을  $\hat{b}_k = \text{sgn}(C_k^H r)$ 로 출력해야되며 이때 검출 출력  $\hat{b}_k$ 를 위한 필터 계수  $C_k$ 는  $C_k = \arg \min_{\{C\}} E(\|b_k - C^H r\|^2)$ 로 구해지고 이것은 Wiener-Hopf 이론에 의해 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.[3,4,7,8]

$$C_k = E \{r r^H\}^{-1} E\{r b_k^*\} \dots\dots\dots (2)$$

### III. 개선된 MMSE 검출기

이 장에서는 다중사용자 환경의 STBC CDMA 시스템에서 시공간 다이버시티이득도 얻고 다중간섭(MAI : Multiple Access Interference)도 제거시키며 각 경로의 수신신호에 대한 동일이득(Equal gain)과 비례이득(Proportional gain)을 비례이득 적용계수  $y$ 와 혼합비율 계수  $r$ 을 통해 여러가지 형태로 조합해서 만든 다중경로이득(Multi-Path gain)을 적용시켜 성능을 개선시킨 MMSE 다중사용자 검출기를 제안한다.

본 연구의 시스템 모델은 동기식 BPSK DS-CDMA 시스템의 하향 링크를 고려한 것으로 기지국에 2개의 안테나, 단말에 1개의 안테나를 가정하고 시공간 부호화 기법으로는 Alamouti가 제안한 STBC를 적용하며 데이터 전송은  $(2i-1)$ 번째 심벌구간 동안은  $b(2i-1)$ 과  $b(2i)$ 를 전송 안테나 TX1과 TX2를 통해 동시에 전송하고 그 다음 심벌구간 동안에  $-b^*(2i)$ 와  $b^*(2i-1)$ 를 전송하는 것으로 한다. 그리

고 채널 모델은 주파수 선택적이고 충분히 긴 시간 동안 채널 상태가 일정하고 다음 순간에 독립적으로 변하는 유사정적 채널로 하고 채널의 지연값은 최대  $L$ 칩 시간으로 하며  $L$ 은 한 심벌에 포함되는 칩의 수  $N$ 보다 작다고 가정한다.

다음의 그림3은 본 연구에서 제안한 MMSE 다중사용자 검출기의 구조로 칩 상관필터와  $2N+L$ 칩 샘플 저장부, 가중치 벡터  $w_l$ 을 이용한 다중간섭 필터부, 동일이득(Equal gain)과 비례 이득(Proportional gain)을 여러가지 형태로 조합한 다중경로이득(Multi- Path gain) 적용부, 콤팩터와 최종 값 결정부 등의 4개의 부분으로 구성된다.

그림 3의 제안된 검출기의 처리과정은 다음과 같다. 먼저 수신신호  $r(i)$ 는 칩 상관 필터와  $2N+L$  샘플 저장부를 거쳐서  $k$ 번째 사용자의  $i$ 번째 데이터에 대한  $l$ 번째 다중경로로 동기화된 연속 두개 심벌구간 동안의 표본화 벡터  $r_l(2i)$ 와  $r_l(2i-1)$ 를 하나로 표시한  $\bar{r}_l(i)$ 가 되며 이것은 제안한 검출기가 수신 신호 중에서 첫 번째 사용자에 대한 신호검출을 원하는 것으로 가정하는 경우에 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

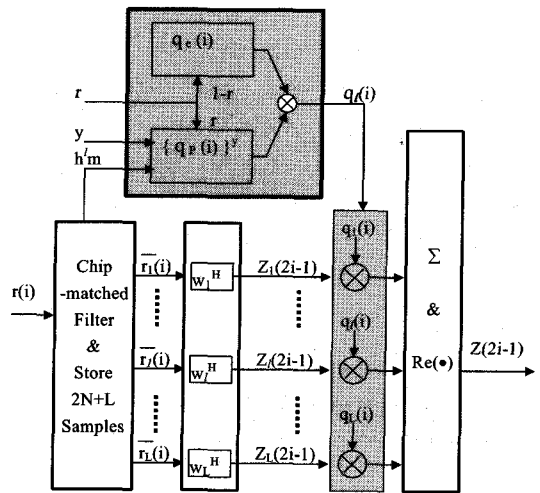


그림 3. 개선된 검출기 구조  
Fig. 3 Improved MMSE Detector

식(3)은 아래와 같이 네 개의 항으로 표현되는데 여기서 첫 번째 항은 검출하고자 하는 사용자신호에 대한 것이고 두 번째 항은 검출하고자 하는 사용자신호의 심벌간 간섭이며 세 번째 항은 다중사용자 간섭 그리고 마지막 네 번째

항은 잡음을 표현하는 것이다.

$$\begin{aligned} \bar{r}_i(i) &\equiv [r_i(2i)r_i(2i-1)]^T \\ &= g_{i,-1}^l b_1(2i-1) + \sum_{j=-3, j \neq -1}^2 g_{i,j}^l b_1(2i+j) \\ &\quad + \sum_{k=2}^K \sum_{j=3}^2 g_{k,j}^l b_k(2i+j) + \hat{n}_i(i) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

식(3)의 표현에서 사용되는  $i$ 는  $i$ 번째 수신 데이터를 뜻하며,  $j$ 는 수신 신호 전후의 간섭 위치를,  $k$ 는 다중 사용자 중의  $k$ 번째 사용자를, 1은 1번째 다중 경로를 의미한다.

한편 위의 식(3)에서  $g_{k,j}^l$ 는 다음의 식(4)와 같이 정의되며 이때 유효 확산 부호  $s_{k,m}^{l,j}$ 는  $s_{k,m}^{l,n} \equiv P_{k,j}^l h_m$ 으로 정의되고  $P_{k,j}^l$ 는 확산 심벌열,  $m$ 은 안테나 번호이다.

$$\begin{aligned} g_{k,-3}^l &\equiv \begin{bmatrix} 0_{NX1} \\ (s_{k,1}^{l,0})^* \end{bmatrix}; & g_{k,-2}^l &\equiv \begin{bmatrix} 0_{NX1} \\ (s_{k,2}^{l,0})^* \end{bmatrix}; \\ g_{k,-1}^l &\equiv \begin{bmatrix} s_{k,1}^{l,1} + s_{k,2}^{l,0} \\ (s_{k,1}^{l,2} + s_{k,2}^{l,1})^* \end{bmatrix}; & g_{k,0}^l &\equiv \begin{bmatrix} -s_{k,1}^{l,0} + s_{k,2}^{l,1} \\ (-s_{k,1}^{l,1} + s_{k,2}^{l,2})^* \end{bmatrix}; \\ g_{k,1}^l &\equiv \begin{bmatrix} s_{k,2}^{l,2} \\ 0_{NX1} \end{bmatrix}; & g_{k,2}^l &\equiv \begin{bmatrix} -s_{k,1}^{l,2} \\ 0_{NX1} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

검출의 다음 과정은 그림3에서 보듯이  $l$ 번째 경로에 대한 본래의 신호 값인  $b_l(2i-1)$ 을 검출하기 위해 식(3)으로 표시되는 첫 번째 사용자의  $i$ 번째 데이터에 대한  $l$ 번째 경로의 수신신호  $\bar{r}_i(i)$ 에서 가중치 벡터  $w_l$ 를 이용하여 다중 간섭을 제거한다. 여기서 가중치 벡터  $w_l$ 은 MSE (Mean Square Error)를 최소화 하는 조건을 만족해야 하며 이것은 Weiner-Hopf 이론에 의해 다음 식(5)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} w_l &\equiv \arg \min_{w \in \mathbb{C}^{2MX1}} E \left[ b_l(2i-1) - w^H \bar{r}_i(i) \right]^2 \\ w_l &= E \left[ \bar{r}_i(i) \bar{r}_i^H(i) \right]^{-1} E \left[ \bar{r}_i(i) b_l^*(2i-1) \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

식 (5)의 가중치벡터  $w_l$  값을 이용하여 다중 간섭을 제거시킨 경로  $l$ 의 수신신호에 대한 필터부 출력신호  $z_l(2i-1)$ 은 다음 식(6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} z_l(2i-1) &= w_l^H \bar{r}_i(i) \\ &= v_{-1}^l b_1(2i-1) + \sum_{j=-3, j \neq -1}^2 v_j^l b_1(2i+j) + \tilde{n}_i(i) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서  $v_j^l \equiv w_l^H g_{i,j}^l$ ,  $\tilde{n}_i(i) \equiv w_l^H \hat{n}_i(i)$  이다

마지막 처리 단계로 최종 검출 값을 구하는 과정은 식(6)에서 구한 값인 경로  $l$ 에 대한 필터출력  $z_l(2i-1)$ 에 그림3에서 보여지듯이 각 경로에 대한 동일이득과 비례이득을 혼합비를 계수  $r$ 과 비례이득 적용계수  $y$ 에 따라 조합한 다중경로이득(Multi-Path gain)을 적용하고 이들 출력의 모든 경로의 값을 결합하여 실수부를 취해 구하게 되는데 이것은 다음의 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} z(2i-1) &= \text{Re} \left[ \sum_{l=1}^L q_l(i) z_l(2i-1) \right] \\ &= \text{Re} \left[ \sum_{l=1}^L q_l(i) w_l^H \bar{r}_i(i) \right] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

이때 다중경로이득  $q_l(i)$ 는 다중경로별 동일한 이득 값의  $q_l = 1$ 을 사용하는 동일이득  $q_e(i)$ 와 채널상태에 비례하는 이득값의  $q_l = \sum_{m=1}^2 |h_m^l|^2 / \sum_{m=1}^2 \|h_m\|^2$ 을 사용하는 비례이득  $q_p(i)$ 의 여러가지 형태의 조합으로 구성된다.

이러한 다중경로이득 조합 구성은 동일이득과 비례이득을 특정 비율값으로 혼합하기 위한 혼합비를 계수  $r$ 과 비례이득을 특정값의 지수승으로 적용시키기 위한 비례이득 적용 계수  $y$ 를 사용하여 만들어지며 이것을 수식으로 표현한 것이 식(8)이다.

$$q_i(i) = (1-r) * q_e(i) + r * \{q_p(i)\}^y \dots\dots\dots (8)$$

그림 4는 앞의 처리과정을 흐름도로 나타낸 것이다.

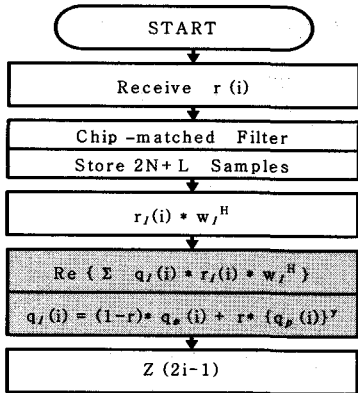


그림 4. 개선된 검출기의 흐름도  
Fig. 4 Flowchart of Improved Detector

다음은 제안한 검출방식의 성능 비교를 위해서 먼저  $b_i(2i-1) = 1$ 과  $s = (b^T h^T)^T$ 를 조건부로 하는 식 (7)의 최종 검출값에 대한 조건부평균 A와 분산  $\sigma^2$ 을 구한 다음에 데이터  $b_i(2i-1)$ 이 1로 전송될 때 이것을 -1로 판별할 경우의 비트오율 확률분포를 구한다.

$s = (b^T h^T)^T$ 와  $b_i(2i-1) = 1$ 을 조건부로 하는 식 (7)의 최종 검출 값인  $z(2i-1)$ 의 조건부 평균 A와 분산  $\sigma^2$ 을 구하면 다음 식(9), (10)과 같다.

$$A = \text{Re}(E[z(2i-1) | s, b_i(2i-1) = 1])$$

$$= \text{Re} \left[ \sum_{l=1}^L \left\{ q_l v_{l-1} + \sum_{j=-3, j \neq -1}^2 q_j v_j^l b_1(2i+j) \right\} \right] \dots\dots\dots (9)$$

$$\sigma^2 = \text{var}[z(2i-1) | s, b_i(2i-1) = 1] / 2$$

$$= \left[ \sum_{l=1}^L q_l^2 \sigma_l^2 + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1, j \neq l}^L q_l q_j w_l^H \tilde{R}_j w_j \right] / 2 \dots\dots\dots (10)$$

최종 검출값의 조건부 평균과 분산인 위의 식(9)와

(10)으로부터 데이터  $b_i(2i-1)$ 의 값이 1로 전송될 때 이것을 -1로 판별할 경우의 비트오율 확률분포는  $SNR = (A^2/\sigma^2)$ 이므로 다음 식(11)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{e|s} = Q(\sqrt{SNR}) = Q(\sqrt{A^2/\sigma^2}) = Q(A/\sigma) \dots\dots\dots (11)$$

위 식(11)에서 사용된 조건 상태  $s$ 는  $s = (b^T h^T)^T$ 로 데이터 벡터  $b$ 와 페이딩 채널 계수  $h$ 로 구성되는데 여기서  $b$ 는  $b_i(2i-1)$ 에 심벌간 간섭을 야기하는 데이터 벡터로  $b = [b_i(2i-3) \ b_i(2i-2) \ b_i(2i-1) \ b_i(2i) \ b_i(2i+1) \ b_i(2i+2)]^T$ 를 의미하므로 위의 식 (11)을 모든 가능한  $b$ 에 대한 조건부 확률의 평균을 취하면 식 (11)은 페이딩 채널계수  $h$ 만을 조건부로 사용하는 다음 식(12)와 같이 쓸 수 있다.

식(12)에서 최종적인 비트오율 확률분포  $P(E)$ 는 페이딩 채널계수에 대해 평균을 취해야 하는데 이것은 평균을 구하는 것이 어렵기 때문에 몬테카를로 적분을  $10^5$ 번 수행하여 근사적으로 구한다.

$$P_{e|h} = \frac{1}{2^5} \sum_{all \ b \in X} Q\left(\frac{A}{\sigma}\right)$$

$$= \frac{1}{2^5} \sum_{all \ b \in X} Q \left( \frac{\text{Re} \left[ \sum_{l=1}^L \left\{ q_l v_{l-1} + \sum_{j=-3, j \neq -1}^2 q_j v_j^l b_1(2i+j) \right\} \right]}{\sqrt{\sum_{l=1}^L q_l^2 \sigma_l^2 + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1, j \neq l}^L q_l q_j w_l^H \tilde{R}_j w_j}} / 2 \right) \dots\dots\dots (12)$$

이와 같이 본 논문에서 제안한 동일이득과 비례이득을 조합한 다중경로 이득 (Multi-Path gain)을 적용하여 성능을 개선시킨 MMSE 검출기의 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 를 구한 다음 이것을 기존 방식의 값과 비교하여 성능을 분석한다.

#### IV. 비교 및 분석

본 장에서는 다중사용자 환경의 STBC CDMA 시스템에서의 기존 MMSE 검출방식과 본 논문에서 제안한 검출방식을 비트 오율 확률분포  $P(E)$ 의 관점에서 비교 분석한다. 성능 비교는 채널의 지연 값 L, 사용자 수 K, 신호대잡음비

SNR 에 대한 비트 오율 확률분포 값  $P(E)$  의 그래프를 통해 나타낸다. 본 논문에서 제안한 검출방식은 다중경로이득 (Multi Path gain)을 구성하기 위한 동일이득과 비레이득에 대한 관련 계수 값들을 비레이득 적용계수  $y$  값은  $y=1, y=2, y=3$ 이고 혼합비율 계수  $r$  값은  $r=0\%, r=50\%, r=75\%, r=100\%$ 인 경우에 대해서 세분하여 성능을 비교 분석한다.

그래프 상의 표기는 기존의 검출방식은 MMSE 라는 표기를 사용하고 본 논문에서 제안한 검출 방식은 비레이득 적용계수  $y$  값과 혼합비율 계수  $r$  값에 따라 "MPG - 비레이득 적용계수  $y$  값 \_ 혼합비율 계수  $r$  값" 으로 나타내는데 여기서 앞쪽에 쓰여진 MPG 란 Multi -Path Gain을 의미한다. 이러한 표기의 예를 들면  $y=1$ 이고  $r=0\%$ 일 때는 MPG-y1\_r0,  $y=2$ 이고  $r=0\%$ 일 때는 MPG-y2\_r0,  $y=3$ 이고  $r=0\%$ 일 때는 MPG-y3\_r0,  $y=1$ 이고  $r=50\%$ 일 때는 MPG-y1\_r50,  $y=1$ 이고  $r=75\%$ 일 때는 MPG-y1\_r75,  $y=1$ 이고  $r=100\%$ 일 때는 MPG-y1\_r100 과 같이 나타내는 것이다.

다음 그림5는 비레이득 적용계수  $y$  값이  $y=1$ 이고 혼합비율 계수  $r$  값이  $r=0\%, r=50\%, r=75\%, r=100\%$ 인 경우 즉 MPG-y1\_r0, MPG-y1\_r50, MPG-y1\_r75, MPG-y1\_r100에 대한 채널의 지연값  $L$ 이  $L=10, L=20, L=30$ , 신호대잡음비 SNR값이  $SNR=15, SNR=12, SNR=9$ , 사용자 수  $K$  값이  $K=10, K=20, K=30$ 일 때의 비트오율 확률 분포 값  $P(E)$ 를 그래프로 보여준 것이다. 그림에서 보듯이  $K$  값,  $L$  값, SNR 값에 따라  $K20-L10-S15, K10-L30-S15, K20-L20-S15, K20-L30-S15, K20-L30-S12, K20-L30-S9, K30-L30-S15$ 의 7가지 상황에 대한  $P(E)$  값을 기존 MMSE 값과 비교하고 있다.

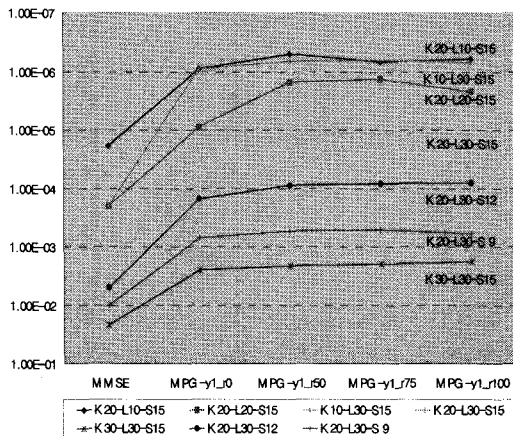


그림 5.  $y=1, r=0, 50, 75, 100$ 일 때의 비교  
Fig. 5 Comparison in  $y=1, r=0, 50, 75, 100$

위의 그림에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 방식들이 기존 방식보다 채널의 지연값  $L$ , 신호대잡음비 SNR, 사용자 수  $K$  값에 무관하게 양호한 성능을 나타내며 제안한 검출방식의 경우에는 혼합비율 계수  $r$  값이  $r=0\%$ 일 때에 비해  $r=50\%, r=75\%, r=100\%$ 인 경우 더 좋은 성능을 보여줌을 알 수 있다. 또한 각각의 검출방식의 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 가 채널의 지연  $L$  값이 커질수록, 신호대 잡음비 SNR 값이 작아질수록, 사용자 수  $K$  값이 커질수록, 나빠지는 것을 알 수 있다.

그림 6은 비레이득 적용계수  $y$  값이  $y=2$ 이고 혼합비율 계수  $r$  값이  $r=0\%, r=50\%, r=75\%, r=100\%$  인 경우 채널의 지연값  $L$ 이  $L=10, L=20, L=30$ , 신호 대 잡음비 SNR 값이  $SNR=15, SNR=12, SNR=9$ , 사용자 수  $K$  값이  $K=10, K=20, K=30$ 일 때의 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 를 그래프로 보여준 것이다.

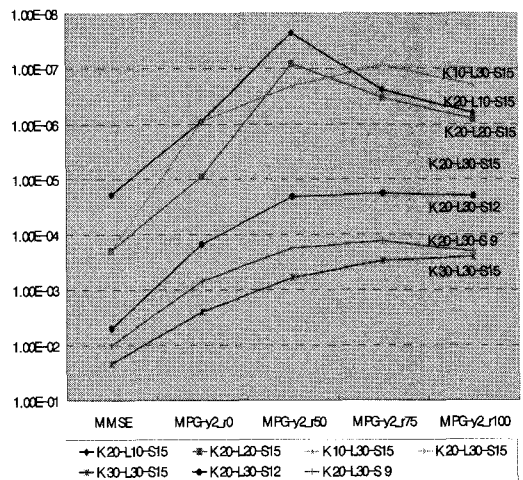


그림 6.  $y=2, r=0, 50, 75, 100$ 일 때의 비교  
Fig. 6 Comparison in  $y=2, r=0, 50, 75, 100$

그림에서 보듯이  $y=2$ 이고,  $r=0\%, r=50\%, r=75\%, r=100\%$ 인 경우도 본 논문에서 제안한 방식들이 기존 방식보다 채널의 지연값  $L$ , 신호대 잡음비 SNR, 사용자 수  $K$  값에 무관하게 양호한 성능을 나타내며 제안한 검출 방식의 경우에는 혼합비율 계수  $r$  값이  $r=50\%$ 과  $r=75\%$ 인 경우 좋은 성능을 보여줌을 알 수 있다.

또한 비레이득 적용계수  $y$  값이  $y=2$ 인 경우도 앞의 그림 5에서 보여준  $y=1$  인 결과와 마찬가지로 각각의 검출 방식의 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 는 채널의 지연  $L$  값이 커질수록, 신호대잡음비 SNR 값이 작아질수록, 사용자 수

K값이 커질수록, 나빠지는 것을 알 수 있는데 이는 채널의 지연이 커지거나 사용자 수가 많으면 많을수록 서로간의 간섭이 더 많이 발생하고 신호대잡음비가 작아지면 그만큼 신호성분이 잡음성분에 비해 작아진 상태이므로 성능이 떨어지는 것으로 보인다.

그림 7은 비례이득 적용계수  $y=3$ 이고 혼합비율 계수  $r$  값이  $r=0\%$ ,  $r=50\%$ ,  $r=75\%$ ,  $r=100\%$ 인 MPG-y3\_r0, MPG-y3\_r50, MPG-y3\_r75, MPG-y3\_r100에 대한 앞의 그림5와 그림6의 경우와 같은 조건에서의 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 를 그래프로 보여준 것이다.

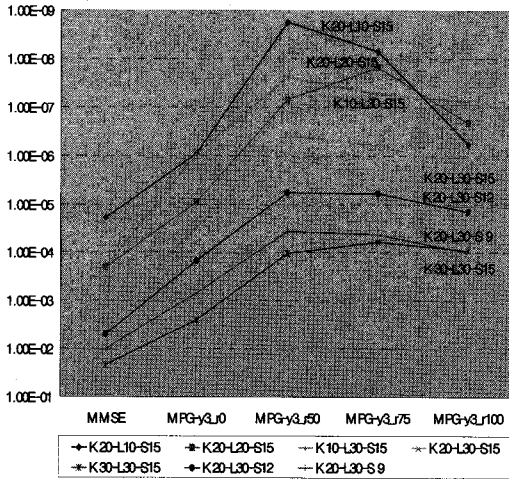


그림 7.  $y=3$ ,  $r=0, 50, 75, 100$ 일 때의 비교  
Fig. 7 Comparison in  $y=3$ ,  $r=0, 50, 75, 100$

그림에서 보듯이  $y=3$ 이고,  $r=0\%$ ,  $r=50\%$ ,  $r=75\%$ ,  $r=100\%$ 인 경우도 앞의 그림6의 결과에서와 같이 본 논문에서 제안한 검출방식들이 기존 방식보다 채널의 지연값  $L$ , 신호대잡음비 SNR, 사용자 수  $K$  값에 무관하게 양호한 성능을 나타내며 제안한 검출방식의 경우에서도 혼합비율 계수  $r$  값이  $r=50\%$ 과  $r=75\%$ 인 경우 좋은 성능을 보여준다. 특이한 점은 혼합비율계수  $r$ 값이 100인 경우에 사용자 수=20, 채널의 지연값=10, SNR=15의 결과인 "K20-L10-S15"가 사용자 수=20, 채널 지연=20, SNR=15의 결과인 "K20-L20-S15"에 비해 성능이 떨어지는 결과가 나타난 것이다.

그림 8은 비례이득 적용계수  $y$ 값이  $y=1, y=2, y=3$ 이고 혼합비율 계수  $r$ 값이  $r=50\%$ 인 MPG-y1\_r50, MPG-y2\_r50, MPG-y3\_r50에 대한 채널의 지연값  $L$ 이  $L=10,$

$L=20, L=30,$  신호대잡음비 SNR값이 SNR=15, SNR=12, SNR=9, 사용자수  $K$ 값이  $K=10, K=20, K=30$ 일 때의 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 를 그래프로 보여준 것이다.

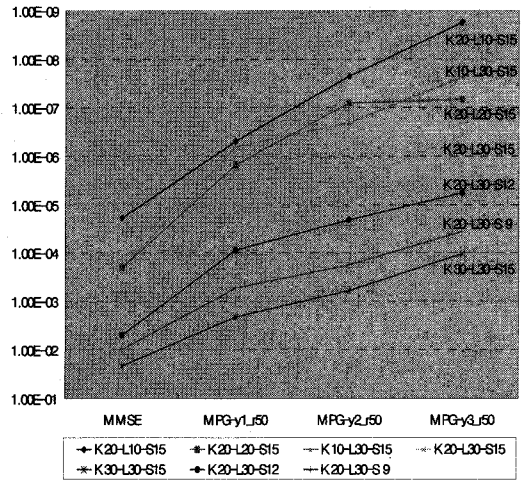


그림 8.  $y=1, 2, 3, r=50$ 일 때의 비교  
Fig. 8 Comparison in  $y=1, 2, 3, r=50$

그림에서 보듯이  $y$ 값이  $y=1, y=2, y=3$ 이고  $r$  값이  $r=50\%$ 인 경우도 본 논문에서 제안한 방식들이 기존방식보다 채널의 지연값  $L$ , 신호대 잡음비 SNR, 사용자 수  $K$  값에 무관하게 양호한 성능을 나타내며 제안한 검출방식의 경우에는 비례이득 적용계수  $y$ 값이 커질수록 더 좋은 성능을 보여줌을 알 수 있다. 또한 앞의 실험에서와 마찬가지로 각각의 검출방식들의 비트 오율 확률분포 값  $P(E)$ 는 채널의 지연  $L$  값이 커질수록, 신호대잡음비 SNR 값이 작아질수록, 사용자수  $K$ 값이 커질수록 성능이 떨어지는 것을 알 수 있으며 특이한 것으로는 채널의 지연 값  $L$ 이  $L=10, L=20, L=30,$  신호대잡음비 SNR 값이 SNR=15, SNR=12, SNR=9, 사용자 수  $K$ 값이  $K=10, K=20, K=30$ 인 각 조건의 대부분의 결과들에서 비례이득 적용계수  $y$ 값의 증가에 따라 비트 오율 확률분포 값  $P(E)$ 가 좋아지는 것을 보이는데 사용자 수=20, 채널 지연값=20, SNR=15인 결과인 "K20-L20-S15"의 경우는  $y=2$ 인 경우와  $y=3$ 인 경우의  $P(E)$  값이 크게 차이가 나타나지 않는다는 것이다.



## V. 결론

본 논문에서는 STBC CDMA 시스템의 다중사용자 환경에서 기존의 MMSE 검출방식이 상대적으로 성능이 떨어지는 단점이 있어 이를 보완하고자 각 경로의 수신 신호에 동일이득과 비레이득을 비레이득 적용 계수  $y$ 와 혼합비율 계수  $r$ 을 이용해 여러가지 형태로 조합해서 만든 다중경로 이득을 적용시켜 성능을 개선시킨 MMSE 다중사용자 검출기를 제안하여 이를 기존의 방식과 성능을 비교 분석하였다.

본 연구의 시스템 모델은 동기식 BPSK DS-CDMA 시스템의 하향 링크를 그리고 채널 모델은 주파수 선택적이고 충분히 긴 시간 동안 채널 상태가 일정하고 다음 순간에 독립적으로 변하는 유사정적 채널로 하였으며 성능비교는 채널의 지연 값  $L$ , 사용자 수  $K$ , 신호대잡음비 SNR에 대한 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 의 그래프를 통해 살펴보았다.

성능분석 결과 제안한 검출 방식이 기존의 방식보다  $L$  값,  $K$  값, SNR 값의 변화에 따른 모든 경우에서 성능향상을 가져옴을 볼 수 있었으며 특히 제안한 검출방식의 경우에는 비레이득 적용계수  $y$  값이 커질수록 더 좋은 성능을 보여줌을 알 수 있었고 혼합비율계수  $r$  값은  $r=0\%$ ,  $r=100\%$  보다  $r=50\%$ ,  $r=75\%$ 일 경우 성능이 더 나음을 알 수 있었다.

또한 각각의 검출방식의 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 는 채널의 지연  $L$  값이 커질수록 그리고 사용자 수  $K$  값이 커질수록 나빠지는 것을 볼 수 있는데 이것은 지연과 사용자 수의 증가로 인한 서로간의 간섭이 더 많이 발생하는 것을 나타내는 것이며 신호대잡음비 SNR 값이 적을 때 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 가 커지는 것은 신호대잡음비가 적은 경우일수록 신호의 성분이 잡음에 비해 적은 상태이므로 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 도 커진다는 것을 알 수 있다.

결론적으로 제안된 검출기는 칩 상관필터와  $2N+L$  칩 샘플저장부, 가중치 벡터  $w_l$ 을 이용한 다중간섭 필터부, 동일이득과 비레이득을 여러가지 형태로 조합한 다중경로이득 적용부, 콤파이너와 최종값 결정부 등으로 구성되어 각 경로에 대한 수신 신호에 가중치 벡터  $w_l$ 을 이용하여 다중간섭을 제거한 다음 동일이득과 비레이득을 조합한 다중경로이득을 적용시키고 이러한 모든 경로에 대한 검출 신호들의 합인 실수부를 취해서 최종 검출값을 결정하는 방식으로 시공간 다이버시티 이득도 얻고 다중 간섭도 제거시키며 추가로 여러가지 형태의 다중경로 이득을 적용하여 성능을 향상

시킨 것이다. 본 논문에서 제안한 방식은 좋은 품질의 고속 서비스를 요구하는 최근의 무선이동 통신환경에서 기존의 MMSE 방식에 비해 구조적으로는 조금 복잡할 수 있으나 성능 면에서는  $L$  값,  $K$  값, SNR 값과 무관하게 모든 경우에 대해 비트오율 확률분포 값  $P(E)$ 의 성능을 개선시킴을 알 수 있었다. 본 논문의 결과는 제한된 조건과 환경에서 비레이득 적용계수  $y$  값과 혼합비율 계수  $r$  값을 적용한 것으로 좀 더 다양한 조건에서 연구를 계속하여 보완한다면 무선이동 통신 환경의 검출 분야에서 더 좋은 성능향상 효과를 보여줄 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] Hong bin Li, Xuguang Lu, and Georgios B. Giannakis, "Capon Multiuser Receiver for CDMA Systems with Space-Time Coding", IEEE Trans. Signal Proc., Vol. 50, No. 5, pp. 1193~1204, May 2002
- [2] H. Huang and H. Viswanathan, "Multiple antennas and multiuser detection in high data rate CDMA systems", in Proc. 2000 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2000), Tokyo, Japan, 2000
- [3] H. V. Poor and S. Verdú, "Probability of error in MMSE multiuser detection", IEEE Trans. Com., Vol. 43, pp. 858~872, May 1997
- [4] M. Latva-aho, M. Juntti, "Modified Adaptive LMMSE Receiver for DS-CDMA Systems in Fading Channels", Proc. of VTC97, pp. 554~558, 1997
- [5] U. Madhow and M. L. Honig, "MMSE interference suppression for direct sequence spread-spectrum CDMA", IEEE Trans. Commun., vol. 42, no. 12, pp. 3178~3188, Dec. 1994
- [6] S. Moshavi, Bellcore, "Multiuser Detection for DS-CDMA Communications", IEEE Communications Magazine, pp. 124~136, Oct. 1996
- [7] Matti Latva-aho and Marku J. Juntti,

- "LMMSE Detection for DS-CDMA systems in fading channels", IEEE Trans. Com., Vol.48, No.2, Feb. 2000
- [8] S. L. Miller, M. L. Honig, and L. B. Milstein, "Performance Analysis of MMSE Receivers for DS-CDMA in Frequency - Selective Fading Channels", IEEE Trans. Com., Vol.48, No.11, pp. 1919~1929, Nov. 2000
- [9] 정남모, 박진수, "나카가미-m 페이딩을 고려한 DS-CDMA 시스템의 PN 부호 획득에 관한 연구", 한국 컴퓨터정보학회 논문지, 제6권, 제3호, pp. 78-83, 2001.
- [10] 김성근, 김영민, "시공간 빔 형성 기술을 이용한 DS-CDMA 시스템의 성능분석", 한국 컴퓨터정보학회 논문지, 제9권, 제2호, pp. 97-104, 2004.

### 저자 소개



#### 유 등 관

1987년 인하대학교 전자과 공학사  
1989년 인하대학교 전자과 공학석사  
1989~1998 LG정보통신 중앙연구소 선임연구원  
1998~현재 동서울대학 컴퓨터정보과 조교수