

MMSE 검출기에서 다중경로 이득 개선에 관한 연구

유 동 관*

A Study on the performance improvement of Multi-Path Gain in a MMSE Detector

Dong-Kwan Yoo *

요 약

본 논문에서는 다중 사용자 환경의 STBC CDMA 시스템에서 기존의 MMSE 검출방식이 여러 경로의 수신신호 중에서 가장 전력이 강한 신호만을 사용하므로 상대적으로 검출 능력이 떨어지는 단점이 있어 이를 보완한 검출방식을 제안한다. 제안한 방식은 각각의 다중경로의 수신신호에 여러 가지 방법으로 혼합된 이득을 적용한 뒤 이들을 결합하여 성능을 개선시킨 방식이다. 개선된 검출방식의 성능분석은 비트 오류 확률 분포 관점에서 이루어졌으며 이것을 기존 MMSE 방식과 비교하였다. 그 결과 다중경로 이득을 여러 가지 방법으로 혼합하여 적용시킨 개선된 검출방식이 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 multi-path gain for a MMSE detector. This method is proposed to complement the shortcomings of the conventional detection method which is used for multiuser detection in STBC 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 increased.

▶ Keyword : Multi-Path Gain Method, MMSE Detector, Multiuser detection

• 제1저자 : 유동관
• 접수일 : 2005.04.11, 심사완료일 : 2005.05.20
* 동서울 대학 컴퓨터정보과 조교수

I. 서론

지난 수년간 급성장을 한 이동통신 환경은 이제는 무선 을 통해 다양한 멀티미디어 정보를 좋은 품질의 고속 서비스로 요구하고 있으며 차세대 무선 이동망은 현재 기술로써 제공할 수 있는 전송률보다 훨씬 높은 전송률을 제공해야 될 것이다. 이를 위해 여러 분야의 연구가 진행되고 있으며 그 중에 다중 안테나와 채널 부호화를 사용하여 전송 다이버시티(Diversity) 이득을 높여 이동통신의 페이딩 상황에서 기존의 통신시스템에 비해 더 높은 전송용량을 제공하는 시공간 부호화(Space-Time Coding)기법과 무선 이동통신에서 여러 명의 사용자 사이에서 발생하는 간섭을 제거하여 무선 자원의 용량을 증가시켜서 성능을 개선시키는 다중 사용자 검출 (Multiuser detection) 기술분야의 연구가 활발히 진행되고 있다.[1,2,7]

본 논문은 다중사용자 환경의 STBC CDMA 시스템에서 전송 용량을 높이고 무선자원의 용량을 증가시켜 고속의 데이터전송을 가능하게 하기 위한 검출 기법의 연구로 시공간 다이버시티 이득도 얻고 다중 간섭도 제거시키며 각각의 다중 경로의 수신신호에 여러가지 방법으로 혼합된 이득을 적용한 뒤 이들을 결합하여 성능을 개선시킨 MMSE 검출기를 제안한다. 제안된 검출 방식은 여러 경로의 수신 신호 중에서 가장 전력이 강한 신호만을 사용하는 기존의 MMSE 검출 방식과 달리 칩 상관필터와 $2N+L$ 칩 샘플 저장부, 가중치벡터 w_l 을 이용한 다중간섭 필터부, 동일이득과 비례이득을 비율 r 을 이용해서 혼합하는 이득합성 및 이득적용부, 콤파이너와 최종 값 결정부 등의 4개의 부분으로 구성되어 각 경로에 대한 수신신호에 가중치 벡터 w_l 을 이용하여 다중간섭을 제거한 다음 각 경로의 특성에 따른 이득을 여러 가지 방법으로 적용시키고 이러한 모든 경로에 대한 검출신호를 전부 결합하여 그것의 실수부를 취해서 최종 검출값을 결정하는 방식으로 동작한다. 제안된 검출기의 성능 분석은 비트 오류 확률 분포 (Probability of Error)를 이용하여 이루어졌으며 기존방식과 비교한 결과 개선된 검출기가 기존 방식보다 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

II. MMSE 검출기

최근 CDMA 시스템에서는 다중 접속 간섭(Multiple Access Interference)의 제거에 관한 연구 및 여러 명의 사용자 사이에서 발생하는 간섭을 제거하여 무선 자원의 용량을 증가시켜서 성능을 개선시키는 다중 사용자 검출 (Multiuser detection)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[4,6]

IS-95 시스템에서는 다중 접속 간섭의 영향을 줄이기 위해 모든 사용자 신호의 전력 레벨을 동일하게 제어하는 전력 제어 방식 (Power Control)을 사용하고 있지만 이러한 전력 제어만으로는 근본적인 확산 부호 열 (Spreading Sequence) 간의 상호 상관 값 (Cross Correlation)에 의해 발생하는 간섭의 제거는 불가능하고 단지 그 영향을 최소화할 뿐이다. 또한 기존의 확산 기반 간섭 제거 방식은 순방향 링크 (Forward Link)의 경우 시스템의 복잡도에 큰 영향을 주기 때문에 그대로 적용하기 어려운 문제를 갖고 있다. 따라서 순방향 링크의 경우 원하는 신호에 대한 정보만을 이용하면서 간단히 간섭을 제거할 수 있는 새로운 구조가 필요한데 이러한 조건을 만족시키기 위해 등장한 방식이 MMSE 검출기이다. 아래 (그림 1)은 DS-CDMA시스템의 MMSE 검출기 모델을 나타낸 것이다.

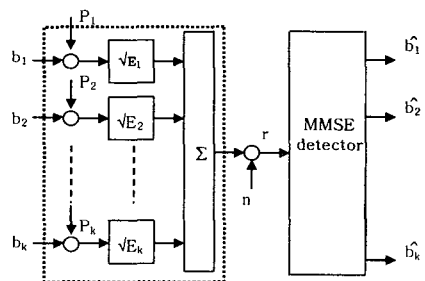


그림 1. MMSE 검출기 모델
Fig. 1 Model of MMSE Detector

위 (그림 1)의 MMSE 검출기모델에서 수신신호 r 은 데이터 심벌 b , 데이터 심벌을 전송하기 위한 확산 심벌 열

P, 데이터 심벌에 해당하는 수신신호 전력 E, 잡음 n 으로 표현할 수 있으며 이것을 행렬과 벡터로 나타낸 것이 식(1)이다. 여기서 식 (1)에 사용된 데이터 심벌 b, 확산 심벌열 P, 수신 신호 전력 E는 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 신호 간의 MSE(Mean Square Error)를 최소화하도록 필터 계수를 조절하는 검출기로 만약 k번째 사용자의 데이터 심벌 b_k 를 검출하는 경우라면 MMSE 검출기는 수신신호 r로부터 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 $C_k = \arg \min \{C_j\} E\{\|b_k - C_k^H r\|^2\}$ 로 구해지고 이것은 Wiener-Hopf 이론에 의해 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.[3.5]

$$C^k = E \{r r^H\}^{-1} E \{r b_k^* \} \dots\dots\dots \text{②}$$

III. 개선된 MMSE 검출기

이 장에서는 STBC CDMA 시스템에서 시공간 다이버시티 이득도 얻고 다중 간섭도 제거시키며 각각의 다중 경로의 수신 신호에 여러 가지 방법으로 혼합된 이득을 적용시킨 다음에 이들을 결합하여 성능을 개선한 MMSE 검출기를 제안한다.

본 연구의 시스템 모델은 동기식 BPSK DS-CDMA 시스템의 하향 링크를 고려한 것으로 기저국에 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 전송하며 다음 심벌구간 동안에 $-b^*(2i)$ 와 $b^*(2i-1)$ 를 전송하는 것으로 한다. 채널 모델은 주파수 선택적이고 충분히 긴 시간 동안 채널 상태가 일정하고 다음 순간에 독립적으로 변하는 유사정적 채널로 하고 채널의 지연값은 최대 L칩 시간으로 하며 L은 한 심벌에 포함되는 칩의 수 N보다 작다고 가정한다.

아래 (그림 2)는 본 연구에서 제안한 검출기의 구조로

칩 상관필터와 2N+L칩 샘플 저장부, 가중치 벡터 w_l 을 이용한 다중간섭 필터부, 동일이득 q_e 와 비례이득 q_p 를 혼합하는 이득합성부 및 이득 적용부, 콤비나이너와 최종 값 결정부 등의 4개의 부분으로 구성된다.

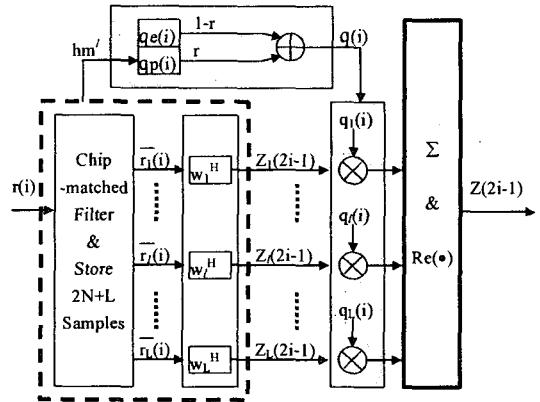


그림 2. 개선된 검출기 구조
Fig. 2 Improved MMSE Detector

위의 (그림 2)에서 보듯이 수신 신호 $r(i)$ 는 칩 상관 필터와 2N+L 샘플 저장부를 거쳐서 k번째 사용자의 i번째 데이터에 대한 l번째 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. 여기서 첫 번째 항은 검출하고자 하는 사용자신호에 대한 것이고 두 번째 항은 검출하고자 하는 사용자신호의 심벌간 간섭이며 세 번째 항은 다중 사용자 간섭 그리고 마지막 네 번째 항은 잡음을 표현하는 것이다.

$$\begin{aligned} \bar{r}_l(i) &\equiv [r_l(2i)r_l(2i-1)]^T \\ &= g'_{1,-1}b_1(2i-1) + \sum_{j=-3, j \neq -1}^2 g'_{1,j}b_1(2i+j) \\ &\quad + \sum_{k=2}^K \sum_{j=-3}^2 g'_{k,j}b_k(2i+j) + \hat{n}_l(i) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

위의 식에서 i는 i번째 데이터를 표현하는 것이며 j는 수신 신호 전후의 간섭 위치를, k는 다중 사용자 중의 k번째 사용자를, l은 l번째 다중경로를 표시한다.

식(3)으로 표시되는 첫 번째 사용자의 i번째 데이터에 대한 l번째 경로의 수신신호 $\bar{r}_l(i)$ 는 (그림 2)에서 보듯이 l 번째 경로에 대한 본래의 신호 값인 $b_l(2i-1)$ 를 검출하기 위해 먼저 가중치 벡터 w_l 를 이용하여 다중 간섭을 제거한다. 여기서 가중치 벡터 w_l 은 MSE (Mean Square Error)를 최소로 하는 조건을 만족해야 하며 이것은 Weiner-Hopf 이론에 의해 다음 식(4)와 같이 구해진다.

$$w_l \equiv \arg \min_{w \in \mathbb{C}^{2 \times M}} E \left[\left| b_l(2i-1) - w^H \bar{r}_l(i) \right|^2 \right]$$

$$w_l = E \left[\bar{r}_l(i) \bar{r}_l^H(i) \right]^{-1} E \left[\bar{r}_l(i) b_l^*(2i-1) \right] \dots\dots\dots (4)$$

식 (4)의 가중치벡터 w_l 값을 이용하여 경로 l의 수신 신호에 대한 필터부 출력 $z_l(2i-1)$ 은 다음 식(5)와 같이 표현된다.

$$z_l(2i-1) = w_l^H \bar{r}_l(i)$$

$$= v_{-1}^l b_l(2i-1) + \sum_{j=-3, j \neq -1}^2 v_j^l b_l(2i+j) + \tilde{n}_l(i) \dots (5)$$

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

식(5)의 경로 l에 대한 필터출력 $z_l(2i-1)$ 은 (그림 2)에서 보듯이 각각의 경로에 대한 이득 $q_l(i)$ 를 적용한 다음 이들 필터출력의 모든 경로의 값을 결합하여 실수부를 취해 식 (6)과 같은 최종 검출값을 구하게 된다.

$$z(2i-1) = \text{Re} \left[\sum_{l=1}^L q_l(i) z_l(2i-1) \right]$$

$$= \text{Re} \left[\sum_{l=1}^L q_l(i) w_l^H \bar{r}_l(i) \right] \dots\dots\dots (6)$$

이때 적용이득 $q_l(i)$ 는 다중경로별 동일한 이득 값의 $q_l = 1$ 을 사용하는 $q_e(i)$ 와 채널 상태에 비례하는 이득 값의 $q_r = \sum_{m=1}^2 |h_m^l|^2 / \sum_{m=1}^2 \|h_m\|^2$ 을 사용하는 $q_p(i)$ 를 1-r과 r의 비율로 혼합한 식(7)과 같다.

$$q_l(i) = (1-r) * q_e(i) + r * q_p(i) \dots\dots\dots (7)$$

다음은 제안한 검출방식의 성능 비교를 위해서 먼저 $b_l(2i-1) = 1$ 과 $s = \{b^T h^T\}^T$ 를 조건부로 하는 식(6)의 최종 검출값에 대한 조건부평균 A와 분산 σ^2 을 구한 다음에 데이터 $b_l(2i-1)$ 이 1로 전송될 때 이것을 -1로 판별할 경우의 비트오율 확률분포를 아래 식(8)과 같이 구한다.

$$P_{e|s} = Q(\sqrt{SNR}) = Q(\sqrt{A^2/\sigma^2}) = Q(A/\sigma) \dots\dots\dots (8)$$

위 식(8)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 $b_l(2i-1)$ 에 심벌 간 간섭을 야기하는 데이터 벡터로 $b = \{b_l(2i-3) b_l(2i-2) b_l(2i-1) b_l(2i) b_l(2i+1) b_l(2i+2)\}^T$ 를 의미하므로 위의 식 (8)을 모든 가능한 b 에 대한 조건부 확률의 평균을 취하면 식(8)은 페이딩 채널계수 h 만을 조건부로 사용하는 식(9)와 같이 쓸 수 있다.

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

$$= \frac{1}{2^S} \sum_{\text{all } b \in X} Q\left(\frac{\text{Re} \left[\sum_{l=1}^L \left\{ q_l v_{-1}^l + \sum_{j=-3, j \neq -1}^2 q_j v_j^l b_l(2i+j) \right\} \right]}{\sqrt{\sum_{l=1}^L q_l^2 \sigma_l^2 + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1, j \neq l}^L q_l q_j w_l^H \tilde{R}_j w_j}} \right) / 2 \dots\dots\dots (9)$$

식(9)에서 최종적인 비트오율 확률분포 P(E)는 페이딩 채널계수에 대해 평균을 취해야 하는데 이것은 평균을 구하는 것이 어렵기 때문에 몬테카를로 적분을 10^6 번 수행하여 근사적으로 구하고 이것에 앞의 식(7)의 혼합비율 r값에 대한 적용이득 $q_l(i)$ 를 이용하여 제안한 검출방식과 기존 방식의 성능을 비교한다.

IV. 분석 및 비교

본 장에서는 다중사용자 환경의 STBC CDMA 시스템에서 기존의 MMSE 검출방식과 본 논문에서 제안한 검출방식을 비트오율 확률분포 P(E)의 관점에서 비교 분석한다.

그리고 비교한 결과를 채널의 지연 값 L , 사용자수 K , 신호 대 잡음비 SNR에 대한 $P(E)$ 그래프로 나타낸다. 여기서 기존의 방식은 MMSE 라는 표기를 사용하고 개선된 방식은 혼합비율 r 을 사용한 MPGM (Multi-Path Gain Method) 이므로 MPGM($r\%$)라는 표기를 사용하여 나타내도록 한다.

(그림 3)은 사용자 수 $K=20$, 신호 대 잡음비 SNR=15 인 상태에서 채널의 지연 값 L 이 10에서 30으로 변화할 때의 비트 오류 확률 분포 특성을 보여준 것으로 그림에서 보듯이 r 값을 0%, 50%, 75%, 100%로 할 경우의 개선된 방식 MPGM(0%), MPGM(50%), MPGM(75%), MPGM(100%)의 성능이 기존의 방식보다 L 값에 상관없이 더 향상되었음을 알 수 있다.

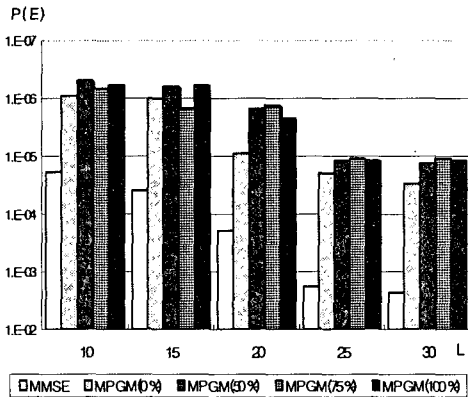


그림 3. $K=20$, SNR=15일 때의 특성곡선
Fig. 3 Curve in $K=20$, SNR=15

(그림 4)는 채널의 지연값 $L=30$, 신호 대 잡음비 SNR =15인 경우 사용자 수 K 값이 $K=10$, $K=20$, $K=30$ 일 때 비트오류 확률분포 값을 그래프로 보여준 것이다. 그림에서 보듯이 제안한 방식들이 기존방식보다 K 값에 무관하게 양호한 성능을 나타내며 제안한 방식들 중에서는 사용자 수 K 값이 $K=10$, $K=20$ 인 경우는 MPGM (75%)가, K 값이 $K=30$ 인 경우는 MPGM(100%)가 가장 나은 성능을 보여 준다.

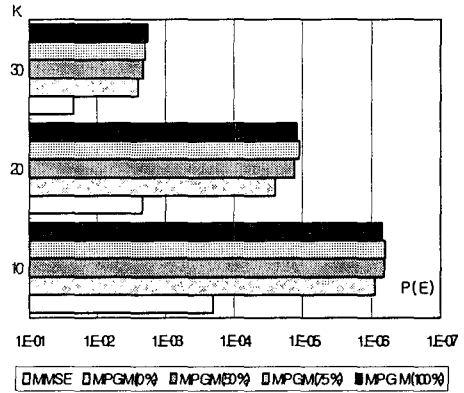


그림 4. $L=30$, SNR=15일 때의 비교
Fig. 4 Comparison in $L=30$, SNR=15

(그림 5)는 채널의 지연 값 $L=30$, 사용자 수 $K=20$ 인 상태에서 신호 대 잡음비 SNR 값을 SNR=9, SNR=12, SNR=15로 할 경우의 제안한 검출 방식들과 기존 방식에 대한 비트 오류 확률분포의 비교이다. 그림에서 보듯이 본 논문에서 제안한 방식들을 기존 방식과 비교해 볼 때 모든 SNR 값에 대해 성능이 향상됨을 알 수 있으며 제안한 방식들 중에서는 SNR 값이 SNR=9, SNR=15인 경우는 MPGM(75%)가, SNR 값이 SNR=12 경우는 MPGM(100%)가 가장 좋은 성능을 보여준다.

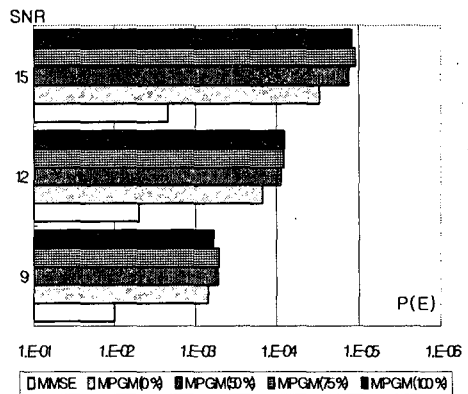


그림 5. $L=30$, $K=20$ 일 때의 비교
Fig. 5 Comparison in $L=30$, $K=20$

V. 결론

본 논문에서는 다중사용자 환경의 STBC CDMA 시스템에서 기존 MMSE 검출방식이 여러 경로의 수신 신호 중에서 가장 전력이 강한 신호만을 사용하므로 상대적으로 검출 능력이 떨어지는 단점이 있어 이를 보완하고자 각각의 다중 경로의 수신신호에 여러 가지 방법으로 혼합된 이득을 적용시켜 성능을 개선한 검출방식을 제안하여 이를 기존방식의 성능과 비교 분석하였다. 성능분석 결과 제안한 MMSE 검출 방식이 기존의 방식보다 L 값, K 값, SNR 값의 변화에 따른 모든 경우에서 성능 향상을 가져옴을 알 수 있었으며 특히 제안한 방식 중에서는 채널의 지연값이 $L=20$ 이상인 경우는 MPGM(75%)가, 사용자 수가 $K=10$, $K=20$ 일 때는 MPGM(75%), $K=30$ 일 때는 MPGM(100%)가, 그리고 신호대 잡음비 값이 $SNR=9$, $SNR=15$ 일 때는 MPGM(75%), $SNR=12$ 일 때는 MPGM(100%)가 좋은 성능을 보여줌을 알 수 있었다.

결론적으로 제안된 검출기는 각 경로에 대한 수신 신호에 가중치 벡터 w_l 을 이용하여 다중간섭을 제거한 다음 각 경로의 특성에 따른 이득을 비율 r 값을 이용하여 결합시키고 이러한 모든 경로에 대한 검출신호를 합한 다음에 그것의 실수부를 취해서 최종 검출값을 결정하는 방식으로 기존 방식에 비해 구조적으로는 조금 복잡할 수 있으나 성능 면에서는 L 값, K 값, SNR값과 무관하게 모든 경우에 대해 비트오율 확률분포의 성능이 개선됨을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] 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

[2] 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

[3] H.V.Poor and S.Verdu, "Probability of error in MMSE multiuser detection", IEEE Trans. Com., Vol.43, pp.858~872, May 1997

[4] 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

[5] 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

[6] 정남모, 박진수, "나카가미-m 페이딩을 고려한 DS-CDMA 시스템의 PN 부호 획득에 관한 연구", 한국 컴퓨터정보학회 논문지, 제6권, 제3호, pp78-83, 2001.

[7] 김성곤, 김영민, "시공간 빔 형성 기술을 이용한 DS-CDMA 시스템의 성능분석", 한국 컴퓨터정보학회 논문지, 제9권, 제2호, pp97-104, 2004.

저자 소개



유 동 관

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