

다중 안테나 SC-FDMA 시스템을 위한 격자 감소기반 신호검출 기법

정 다 훈*, 김 재 권^o

A Lattice Reduction-Based Detection Technique for Multi-Antenna SC-FDMA System

Da Hoon Jeong*, Jaekwon Kim^o

요 약

본 논문에서는 다중안테나 single carrier frequency division multiple access (SC-FDMA) 시스템의 채널 이득 행렬 구조를 활용한 새로운 신호검출기법을 제안한다. 제안된 기법은 큰 채널이득 행렬을 여러 개의 작은 행렬로 근사화 할 수 있다는 점과 작은 행렬에 격자감소기술을 효과적으로 적용할 수 있다는 점을 활용한다. 모의실험을 통해 제안된 기법의 개선된 성능을 확인한다.

Key Words : SC-FDMA, MIMO, Signal Detection, Lattice Reduction

ABSTRACT

In this paper, we address data detection technique using Fixed complexity LLL-based signal detection over multi-antenna SC-FDMA wireless channels. We use the property of effective channel matrix of SC-FDMA system. We can make the large effective channel matrix to various small effective channel matrix. We show that error performance of proposed detection technique

I. 서 론

LTE-Advanced 시스템 상향링크의 표준인 SC-FDMA 시스템은 간단한 주파수 영역 선형 등화 기법을 사용할 수 있다^[1]. 수신부에서 계산하는 연산 정 값의 신뢰도를 향상시키는 기법^[2]과 선형등화기법이 초래하는 성능열화를 극복하기 위해 심볼의 신뢰도를 활용하는 기법이 제안되었다^[3].

다중 안테나 시스템의 선형검출기법의 오류성능을 개선하기 위해 격자감소기법을 기본으로 하는 개선된 고정 연산량 신호검출 기법이 제안되었다^[4]. 본 논문에서는 다중안테나 SC-FDMA 시스템의 채널이득 행렬의 구조와 격자감소 기법을 효과적으로 활용하는 새로운 신호검출 기법을 제안한다.

II. 다중안테나 SC-FDMA 시스템

다중안테나 시스템 $n_R \times n_T$ 에 N_{RB} 개의 자원블록(resource block; RB)할당 시, 송신 신호는 아래 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 각 RB는 12개의 subcarriers로 구성된다.

$$\mathbf{s} = [\mathbf{s}_1^T \mathbf{s}_2^T \cdots \mathbf{s}_{n_T}^T]^T \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{s}_i = [s_{1i} \ s_{2i} \ \cdots \ s_{12N_{RB}i}]^T$ 는 i 번째 송신 안테나로부터 전송된 신호 벡터이다. 송신신호는 $M \times M$ DFT 행렬(\mathbf{F}_M), 자원매핑행렬 (\mathbf{M}), $N \times N$ IFFT행렬(\mathbf{F}_N^H)들을 통과 한 후 Cyclic Prefix가 삽입 되어 전송된다. 수신부에서 송신부와 역순으로 신호를 처리하면 다음의 송수신관계를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}_{\text{eff}} \mathbf{s} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{\text{eff},11} & \mathbf{H}_{\text{eff},12} & \cdots & \mathbf{H}_{\text{eff},1n_T} \\ \mathbf{H}_{\text{eff},21} & \mathbf{H}_{\text{eff},22} & \cdots & \mathbf{H}_{\text{eff},2n_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{\text{eff},n_R1} & \mathbf{H}_{\text{eff},n_R2} & \cdots & \mathbf{H}_{\text{eff},n_Rn_T} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{H}_{\text{eff},ji} = \mathbf{F}_M^H \mathbf{M}^T \mathbf{F}_N \mathbf{H}_{ji} \mathbf{F}_N^H \mathbf{M} \mathbf{F}_M$, $\mathbf{z} = [\mathbf{z}_1^T \mathbf{z}_2^T \cdots \mathbf{z}_{n_T}^T]^T$,

※ This work was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Fund of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology(2009-0068222)

• First Author : Computer and Telecommun. Engineering, Yonsei University, Wonju, jdhgag1202@naver.com, 학생회원

o Corresponding Author : Computer and Telecommun. Engineering, Yonsei University, Wonju, jaekwon@yonsei.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2014-06-245, Received June 25, 2014; Revised July 8, 2014; Accepted July 8, 2014

$$\mathbf{z}_j = \sum_{i=1}^{n_T} \mathbf{H}_{\text{eff},ji} s_i + \tilde{\mathbf{n}}_j, \quad \tilde{\mathbf{n}} = [\tilde{\mathbf{n}}_1^T \tilde{\mathbf{n}}_2^T \cdots \tilde{\mathbf{n}}_{n_R}^T]^T,$$

$\tilde{\mathbf{n}}_j = \mathbf{F}_M^T \mathbf{M}^T \mathbf{F}_N \mathbf{n}_j$ 이고, \mathbf{H}_{ji} 는 i 번째 송신 안테나와 j 번째 수신 안테나 사이의 채널 이득으로 구성된 $N \times N$ 순환 행렬, \mathbf{n}_j 는 복소수 Gaussian 잡음 벡터이다.

III. 기존 신호검출기법

기존 주파수영역 선형 등화기법은 식(4)와 같이 간단히 수행된다. 그러나 일반적으로 잘 알려져 있듯이 채널행렬의 condition number가 클 경우 심각한 성능 열화를 초래한다.

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{W}_{\text{MMSE}} \mathbf{z} \quad (4)$$

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = (\mathbf{H}_{\text{eff}}^H \mathbf{H}_{\text{eff}} + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_{\text{eff}}^H \quad (5)$$

선형등화기법의 열화 된 성능을 개선하기 위해서 심볼의 신뢰도를 활용하는 신호검출기법이 제안되었다^[2,3]. 새로운 기법^[2,3]은 식(4)로 추정된 신호벡터의 k 번째 심볼인 \hat{s}_k 의 신뢰도를 식(6)과 같이 계산할 수 있다는 점을 활용한다.

$$\min_{s \in \Omega \setminus \{\hat{s}_i\}} \left\| \mathbf{z} - \sum_{k=1, k \neq i}^{12N_{RB} n_T} \mathbf{h}_{\text{eff},k} \hat{s}_k - \mathbf{h}_{\text{eff},i} s_i \right\| \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{h}_{\text{eff},k}$ 는 \mathbf{H}_{eff} 의 k 번째 컬럼, Ω 는 성상도 집합, 그리고 $\{\cdot\} \setminus \{\cdot\}$ 연산은 집합 빼기 연산을 의미한다. 신뢰도가 낮은 적은 수의 심볼들은 조인트 검출 및 이의 반복을 통해 성능을 개선한다.

IV. 제안된 신호검출기법

본 절에서는 채널이득행렬 구조를 근사화한 후 작은 차원의 송수신관계를 유도하고 격자감소기반 신호검출기법을 적용하는 절차를 설명한다.

4.1 채널이득행렬의 근사화

두 개의 송수신 안테나의 경우 채널이득행렬 \mathbf{H}_{eff} 의 (l, k) 번째 원소 값의 크기 $|h_{\text{eff},lk}|$ 는 $(l=1, 2, \dots, 12N_{RB} n_R, k=1, 2, \dots, 12N_{RB} n_T)$ 그림 1과 같은 특징을 갖고 있다. 원소 값은 대각성분을 제외하면 0에 가까운 값을 가진다. 그림 1은 $N_{RB}=2, n_T=2$ 인 경우 Ped A 채널에 대한 예시이다. $n_T=n_R=2$ 인 경우에

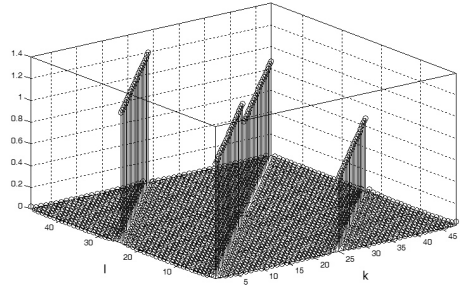


그림 1. ITU-R Ped A 2×2채널의 $|h_{\text{eff},lk}|$
Fig. 1. $|h_{\text{eff},lk}|$ of 2×2 ITU-R Ped A channel

대해서 \mathbf{H}_{eff} 의 원소 값 $h_{\text{eff},lk}$ 은 아래와 같이 근사화할 수 있다.

$$h_{\text{eff},lk} = 0, \text{ if } |\text{mod}(l, 12N_{RB}) - \text{mod}(k, 12N_{RB})| > B \quad (7)$$

여기서 $\text{mod}(\cdot)$ 는 나머지 연산을 의미하고 B 는 근사화의 정도를 결정하는 변수이다.

4.2 작은 차원의 송수신 관계

수식(7)의 관계를 이용해 수식(2)로 표현되는 송수신관계를 $n_T=n_R=2$ 인 경우 아래와 같이 $12N_{RB}$ 개의 작은 차원의 송수신 관계로 표현할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{z}}_m = \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},m} \bar{\mathbf{s}}_m + \bar{\mathbf{n}}_m \quad m = 1, 2, \dots, 12N_{RB} \quad (8)$$

$$\text{여기서 } \bar{\mathbf{s}}_m = [\bar{\mathbf{s}}_{1,m}^T \bar{\mathbf{s}}_{2,m}^T]^T, \quad \bar{\mathbf{s}}_{i,m} = [s_{i,m-B} s_{i,m-B+1} \cdots s_{i,m+B}]^T, \quad \bar{\mathbf{z}}_m = [\bar{\mathbf{z}}_{1,m}^T \bar{\mathbf{z}}_{2,m}^T]^T, \quad \bar{\mathbf{z}}_{i,m} = [z_{i,m-B} z_{i,m-B+1} \cdots z_{i,m+B}]^T, \quad \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},m} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{\text{eff},m,11} & \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},m,12} \\ \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},m,21} & \mathbf{H}_{\text{eff},m,22} \end{bmatrix},$$

$\bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},m,ji} = \mathbf{H}_{\text{eff},ji} (m-B : m+B, m-B-1 : m+B+1)$ 이다. $\bar{\mathbf{n}}_m$ 는 $\bar{\mathbf{z}}_m$ 과 유사하게 정의된다. 수식(8)의 관계는 임의의 n_T 및 n_R 에 대해 성립한다.

수식(2) 채널 행렬 \mathbf{H}_{eff} 의 크기는 $12N_{RB} n_R \times 12N_{RB} n_T$ 이지만 수식 (8)의 채널행렬 $\bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},m}$ 의 크기는 $((2B+1)n_R) \times ((2B+3)n_T)$ 이다. 작은 차원에서의 행렬 $\bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},m}$ 은 B 에 비례하여 크기가 증가한다. Ped A의 경우 근사화의 정도를 결정하는 변수 값은 $B=1$ 이므로 충분하므로 실제적인 시스템의 파라미터를 고려했을 때 $12N_{RB}$ 에 비해 $2B+3$ 이 상대적으로 매우 작다. 예를 들어 $N_{RB}=2, n_R=n_T=2, B=1$ 인 경우 \mathbf{H}_{eff} 의 크기는 48×48 이고 $\bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},m}$ 의 크기는 6×10 이다. 일반

적으로 선형검출에서의 연산복잡도는 행렬의 크기의 제곱에 비례한다. 따라서 작은 크기의 채널행렬을 동반하는 수식(8)의 관계를 이용해 신호검출의 연산 복잡도를 크게 감소시킬 수 있다.

4.3 격자감소기반 신호검출기법

수식(8)을 이용하여 신호검출성능을 더욱 향상시키기 위해 격자감소기법을 적용할 수 있다. 격자감소기법은 채널행렬의 condition number를 선형검출기법 전에 감소시키는 방법으로 간단한 선형검출기법을 사용하여 신호검출성능을 향상시킬 수 있다. 그림1으로부터 SC-FDMA 시스템의 채널이득행렬은 대각 성분 중심으로 같은 값이 반복되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 B 를 이용해 잘라낸 작은 채널이득행렬들은 아래 식(9)와 같은 특징을 가지고 있다.

$$\bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},m} = \bar{\mathbf{H}}_{\text{eff},1}, \forall m \quad (9)$$

식(9)로부터 $12N_{RB}$ 개의 작은 채널에 대해 매번 격자감소절차를 진행할 필요가 없다는 것을 알 수 있다. 격자감소절차는 일회만 수행한 후 그 결과를 계속 사용하면 되므로, 추가적인 연산이 크지 않다. 즉 선형검출이 $12N_{RB}$ 회 수행되는 동안 격자감소절차는 한 번만 수행한다.

V. 모의실험

그림 2는 $N_{RB}=2$, $n_T=n_R=2$ 그리고 제안된 방

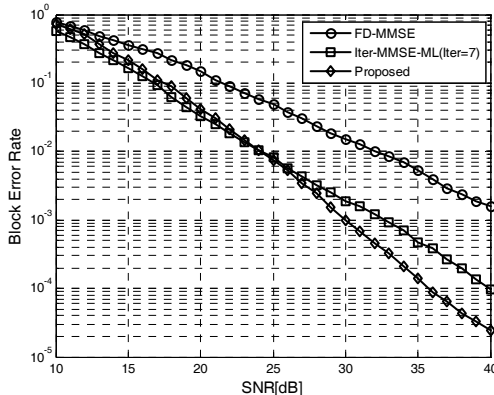


그림 2. 주파수영역 선형등화기법(FDE), 신뢰도 기반 반복적 검출기법(Iterative 반복횟수:7), 제안된 기법(proposed)의 오류성능 비교

Fig. 2. Comparison of error performance of frequency domain linear equalization (FDE-MMSE), reliability-based iterative detection (Iter-MMSE-ML, number of iterations=7), and the proposed technique.

식의 파라미터 $B=1$ 로 설정했을 때, 기존의 두 가지 검출기법들과 제안된 기법의 블록($12N_{RB}n_T$ 개의 심볼) 오류성능을 비교한다. 그림 2를 통해 제안된 기법이 타겟 오류 확률 0.001에서 기존 FD-MMSE 방식에 비해 약 10dB이득이 있고, 기존 신뢰도 기반 반복적 검출기법에 비해 약 3dB이득을 확인할 수 있다. 채널 SNR이 25dB이하인 경우는 제안된 기법이 기존 FD-MMSE 보다는 우수한 성능을 달성하나 기존 신뢰도 기반 검출기법에 대해서는 작은 성능연화가 있다. 기존 신뢰도 기반 기법은 신호 검출시 잡음이 증폭되지 않는 조인트 검출방식을 사용하지만 제안된 방식은 잡음의 증폭이 있는 선형등화기법을 이용한다. 따라서 잡음이 많은 낮은 채널 SNR에서는 기존 신뢰도 기반의 검출기법에 비해 상대적으로 작은 성능연화가 있는 것으로 추정된다.

VI. 결론

본 논문에서는 다중안테나 SC-FDMA 시스템을 위한 새로운 신호검출기법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 채널이득을 나타내는 큰 행렬을 여러 개의 작은 행렬로 근사화할 수 있다는 점과 작은 행렬에 격자감소기법을 효과적으로 적용할 수 있다는 점을 활용하였다.

References

- [1] H. G. Myung, J. Lim, and D. Goodman, "Single carrier FDMA for uplink wireless transmission," *IEEE Veh. Tech. Mag.*, vol. 1, no. 3, pp. 30-38, Sept. 2006.
- [2] J. Kim, T. Im, J. Kim, J. Yi, and Y. S. Cho, "An improved LLR generation technique for SC-FDMA systems using frequency domain MMSE equalization," *J. KICS*, vol. 34, no. 12, pp. 1197-1207, Dec. 2012.
- [3] H. Noh, S. Choi, and C. Lee, "An iterative MMSE-ML detector for MIMO SC-FDMA system," in *Proc. IEEE Int. Midwest Symp. Circuits Syst.*, pp. 1-4, Aug. 2011.
- [4] H. Vetter, V. Ponnampalam, M. Sandell, and P. A. Hoeher, "Fixed complexity LLL algorithm," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 4, pp. 1634-1637, Apr. 2009.