Yonsei University

멀티유저 상향링크 Large-MIMO 시스템을 위한 연판정 수신기

박진수, 김인선, 송홍엽

Channel Coding and Crypto Lab.

Yonsei University, Seoul, Korea

2013 / 11 / 30

2013 한국통신학회 추계종합학술발표회

I. 서 론

- Large-MIMO 시스템
  - 폭발적으로 증가하는 전송 데이터 양과 요구 속도
  - 여러 개의 안테나를 사용하는 MIMO 시스템이 사용되고 있음
  - 최근 수십개 이상의 안테나를 사용한 Large-MIMO 시스템이 관심을 얻고 있음
  - 그에 따른 연산량 처리 문제

- 일반적인 MIMO 시스템의 수신기
  - ZF (Zero Forcing) 또는 MMSE (Minimum Mean Square Error) detector
  - 수신 신호 벡터에 detector 행렬을 곱하는 선형 연산
  - 해당 행렬을 구하기 위해 필요한 역행렬 연산
  - 이러한 역행렬은 송/수신 안테나 수에 비례하여 커짐
  - Large-MIMO 시스템을 사용할 때, 이러한 역행렬을 구하는 ZF, MMSE detector는 많은 연산량이 필요해짐
  - 그에 따라, 역행렬 연산이 필요 없으면서도 최적에 가까운 성능을 보이는 MRC (Maximal Ratio Combining) detector를 사용할 것이 제안됨

II. 시스템 모델

- 멀티유저 상향링크 Large-MIMO 시스템
  - 하나의 안테나를 가진 $\boldsymbol{K}$ **명의 유저**들의 상향링크
  - BS (Base Station) 에서는 $\boldsymbol{M}$**개의 안테나**를 사용
  - BS 측에서 많은 수의 안테나를 사용하는 $\boldsymbol{K} \ll \boldsymbol{M}$ 환경을 가정
  - 송신 벡터 $\boldsymbol{x} = [x_1\ x_2 \cdots x_K]^T$
    - i 번째 유저의 송신 신호 $x_i \in \{+1, -1\}$ (BPSK 변조 가정)
  - 채널 행렬 $\boldsymbol{H} \in \mathbf{C}^{M \times K}$
    - i 번째 유저와 j 번째 수신 안테나 사이의 채널 $h_{ji} \sim \mathbf{C}N(0,1)$
  - 잡음 벡터 $\boldsymbol{n} = [n_1\ n_2 \cdots n_M]^T$
    - j 번째 수신 안테나의 잡음 $n_j \sim \mathbf{C}N(0, \sigma^2{}_n)$
  - 각 채널들은 서로 i.i.d 이며, 각 잡음들 또한 서로 i.i.d
  - 송신 신호 크기 $\sqrt{P}$
  - 수신 벡터 $\boldsymbol{y} = [y_1\ y_2 \cdots y_M]^T$

$$\boldsymbol{y} = \sqrt{P}\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}$$

  - 수신 BS 측에서는 채널 행렬 $\boldsymbol{H}$를 완벽히 알고 있음을 가정 (CSIR)

III. 연판정 MRC Detector

- MRC Detector (1/2)
  - 유저의 수보다 수신 안테나 수가 훨씬 많은 $K \ll M$ Large-MIMO 환경
  - 이 때, MRC detector가 최적의 성능에 근접함이 잘 알려져 있음
  - MRC detector $\boldsymbol{G}$

$$\boldsymbol{G} = \frac{1}{M\sqrt{P}}\boldsymbol{H}^H$$

  - $\boldsymbol{H}$의 hermitian 연산으로 간단히 구현 가능
  - 역행렬 연산이 필요 없음
  - 이를 통해 추정된 송신값 $\tilde{\boldsymbol{x}}$

$$\begin{aligned}\tilde{\boldsymbol{x}} &= \boldsymbol{G}\boldsymbol{y} \\ &= \sqrt{P}\boldsymbol{G}\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{n} \\ &= \frac{1}{M}\boldsymbol{H}^H\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \frac{1}{M\sqrt{P}}\boldsymbol{H}^H\boldsymbol{n}\end{aligned}$$

III. 연판정 MRC Detector

- MRC Detector (2/2)

$$\tilde{\boldsymbol{x}} = \frac{1}{M}\boldsymbol{H}^H\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \frac{1}{M\sqrt{P}}\boldsymbol{H}^H\boldsymbol{n}$$

– 이 때, $K \ll M$ 일 때에는 $\boldsymbol{H}^H\boldsymbol{H} \approx M\boldsymbol{I}_{K\times K}$ 로 근사 가능
– 따라서 추정 벡터 $\tilde{\boldsymbol{x}}$ 는 다음과 같이 정리 가능

$$\tilde{\boldsymbol{x}} \approx \boldsymbol{x} + \frac{1}{M\sqrt{P}}\boldsymbol{H}^H\boldsymbol{n}$$

III. 연판정 MRC Detector

- 연판정 MRC Detector (1/2)
  - $\tilde{x}_i$ 를 추정 벡터 $\tilde{\boldsymbol{x}}$의 i 번째 값이라 할 때, $\tilde{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{G}\boldsymbol{y}$를 풀어 쓰면,

$$\tilde{x}_i = \frac{1}{M\sqrt{P}} \sum_{j=1}^{M} {h_{ji}}^{*} y_j$$
$$= \frac{1}{M\sqrt{P}} \sum_{j=1}^{M} {h_{ji}}^{*} \left(\sqrt{P} \sum_{l=1}^{K} h_{jl} x_l + n_j \right)$$

  - 이 때, $\tilde{x}_i$를 Gaussian 분포를 갖는다고 가정
  - $\tilde{x}_i$ 의 평균과 분산으로 $\tilde{x}_i$의 LLR을 추정 가능

III. 연판정 MRC Detector

- 연판정 MRC Detector (2/2)
  - $x_i = +1$ 로 가정하면, $\widetilde{x_i}$ 의 평균과 분산은

$$\mathrm{E}[\widetilde{x_i}|x_i = +1] = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1,l\neq i}^{K} h_{ji}^{*}\, h_{jl}E[x_l] + \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} h_{ji}^{*}h_{ji}$$

$$Var[Re(\widetilde{x_i})|x_i = +1] = \frac{1}{M^2}\sum_{j=1}^{M}\sum_{l=1,l\neq i}^{K}(Re(h_{ji}^{*}h_{jl}))^2\ Var[x_l] + \frac{\sigma_n^2}{2PM}\sum_{j=1}^{M}\left|h_{ji}\right|^2$$

  - 이 때, $E[x_l]$ 와 $Var[x_l]$ 은 각 심볼에 대한 a priori 정보
  - 이렇게 구해진 평균과 분산을 통해 $\widetilde{x_i}$ 의 LLR값 $L_{\widetilde{x_i}}$ 은

$$L_{\widetilde{x_i}} = \frac{2\widetilde{x_i}Re(\mathrm{E}[\widetilde{x_i}|x_i = +1])}{Var[Re(\widetilde{x_i})|x_i = +1]}$$

  - 같은 원리로 QAM 등에도 확장 가능
  - 채널 부호의 연판정 복호를 위해 사용