무선 애드혹 네트워크에서 효율적인 선형 MMSE 수신기

이병주, 박선호, 임채희, 심병효
고려대학교
{bjlee, shpark, chlim}@isl.korea.ac.kr, bshim@korea.ac.kr

A robust linear MMSE receiver for Wireless Ad Hoc Networks

Byungju Lee, Sunho Park, Chaehee Lim, Byonghyo Shim
Korea University

요 약

본 논문에서는 수신단에서 간섭 단말들의 채널상태정보가 불완전한 무선 애드혹 네트워크에서 비모수 선형 MMSE 수신기를 사용하여 네트워크 전송 용량을 향상시키는 기법을 제안한다. 비모수 선형 MMSE 수신기는 수신신호의 자기 상관을 이용한다. 지정된 채널정보를 간섭과 잡음으로만 이루어진 관측들에 포함시킴으로써, 제안된 기법은 최적의 MMSE 전송 용량의 상당한 부분을 달성한다. 실제적인 애드혹 네트워크 시스템의 전송 용량 모의실험을 통해 제안된 기법이 기존의 수신 알고리즘에 비해 상당한 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

최근 들어 다수의 수신 안테나에 따라 네트워크 전송 용량이 선형적으로 증가하는 애드혹 네트워크에 대해 활반한 연구가 진행되고 있다. 애드혹 네트워크에서는 다수의 송신-수신 쌍들이 고정된 기반시설의 도움 없이 동시에 통신한다. 그러나 송신기간 간섭이 상당히 많이 발생하므로, 수신단에서 간섭신호를 다루는 기법이 많은 관심을 얻고 있다 [1, 2]. 최근에, 수신단의 불완전한 채널상태정보 조건에서의 전송 용량이 분석되었다 [1]. 이 기법에서는 MMSE 수신기의 샘플 공분산 행렬이 간섭 단말들의 전송을 관측하면서 얻는다. 샘플의 수가 클 때, MMSE 수신기의 정확도는 최적의 MMSE 필터와 가까워진다. 그러나, 샘플 공분산 행렬이 추정되는 동안 지정된 송신 단말이 비활성 상태를 유지해야 하므로 상당한 전송용량 감소를 가져온다.

본 논문에서는 비모수 선형 MMSE 수신기를 이용하여 네트워크 성능을 향상시키는 새로운 방법을 제안한다. 간섭 단말들의 채널상태정보를 이용할 수 없을 때, 수신신호의 자기상관을 이용하여 MMSE 동작을 한다. 제안된 기법은 지정된 송신 단말의 데이터 수신과 동시에 수신신호의 자기상관 정보를 얻을 수 있어, 송신 단말들의 전송 효율의 손실을 줄이면서 전송 용량에서 상당한 이득을 얻는다.

2. 애드혹 네트워크 및 샘플 공분산 행렬 기법

무선 애드혹 네트워크의 수신신호는

$$y = d^{-\alpha/2} h_d s_d + \sum_{i \in \Lambda(\lambda) \setminus \{Tx_d\}} |X_i|^{-\alpha/2} h_i s_i + w \qquad (1)$$

로서 y 는 $N \times 1$ 수신신호 벡터, d 와 $|X_i|$ 는 각각 지정된 송신-수신 단말간 거리와 i 번째 송신기와 지정된 송신 단말간 거리이다. α 는 경로 손실 지수, h_d 와 h_i 는 각각 지정된 송신 단말과 i 번째 송신 단말의 채널 벡터, λ 는 단위 면적당 송신 단말 수, w 는 부가적인 백색 가우시안 잡음이다. 수신단에서 필터 v_d 를 이용하면, 신호 대 간섭잡음비 (SINR)은

$$SINR = \frac{\rho d^{-\alpha} v_d^H h_d h_d^H v_d}{v_d^H (\sigma^2 I + \rho \sum_{i \in \Lambda(\lambda) \setminus \{Tx_d\}} |X_i|^{-\alpha} h_i h_i^H) v_d} \qquad (2)$$

이 된다. SINR 임계값 β 에서의 오수신 확률은 $P_{out}(\lambda) = P[SINR \le \beta]$ 이다. 최대 송신 단말 밀도는 $\lambda_\varepsilon = \max\{\lambda : P_{out}(\lambda) \le \varepsilon\}$ 여기서 ε 는 오수신 제한, 그리고 네트워크의 전송 용량은 $C(\varepsilon) = \lambda_\varepsilon (1-\varepsilon) \log_2 (1+\beta)$ 이다.

MMSE 수신 필터는 신호 증가와 간섭 억제 사이의 균형을 이루며 SINR 을 최대화 시키는 것으로 잘 알려져 있다 [1]. MMSE 필터는 $v_d = \Sigma^{-1} h_d$ 로 주어지고 여기서 $\Sigma = 1/SNR + d^{\alpha} \sum_{i \in \Lambda(\lambda) \setminus \{Tx_d\}} |X_i|^{-\alpha} h_i h_i^H$ 는 간섭과 잡음의 공분산 행렬이다. 이 MMSE 필터의 SINR 최대값은 $SINR_{MMSE} = h_d^H \Sigma^{-1} h_d$ 이 된다.

불완전한 채널상태정보에서의 MMSE 필터 [1]는 지정된 송신 단말이 비활성화 상태에서 간섭 전송들을 관측하여

공분산 행렬을 추정한다. 지정된 송신 단말이 K 심볼 시간만큼 비활성화 상태 일 때 다음과 같은 샘플 공분산을 형성한다 ($\hat{\Sigma}=\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K} r_i r_i^H$, r_i 는 i 번째 간섭과 잡음의 합). $\hat{\Sigma}$ 을 이용했을 때의 SINR 은 $SINR=\frac{(h_d^H\hat{\Sigma}^{-1}h_d)^2}{h_d^H\hat{\Sigma}^{-1}\Sigma\hat{\Sigma}^{-1}h_d}$ 이고, 기대값은 [3]

$$E_{\hat{\Sigma}}\left[\frac{(h_d^H\hat{\Sigma}^{-1}h_d)^2}{h_d^H\hat{\Sigma}^{-1}\Sigma\hat{\Sigma}^{-1}h_d}\right]=\left(1-\frac{N-1}{K+1}\right)h_d^H\Sigma^{-1}h_d \tag{3}$$

이 된다. K 값이 큰 경우 정확한 샘플 공분산 행렬을 얻을 수 있지만 지정된 송신 단말이 K 심볼 기간 동안 비활성화 되어 있어야 한다. 채널이 T 심볼 기간마다 바뀌는 경우 실제적인 전송 용량은 (T-K)/T 배만큼 감소하게 된다.

3. 비모수 선형 MMSE 수신기

전송 용량의 손실을 줄이기 위하여 제안하는 비모수 선형 MMSE 수신기에서는 지정된 채널 정보 h_d 를 포함하는 수신신호의 자기 상관이 샘플 공분산 행렬을 대체한다. 비모수 자기 상관을 이용하는 선형 필터는

$$v_d=(\Sigma+h_d h_d^H)^{-1}h_d \tag{4}$$

이다. 이 필터의 SINR 값은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$SINR=\frac{(h_d(\Sigma+h_d h_d^H)^{-1}h_d)^2}{h_d^H(\Sigma+h_d h_d^H)^{-1}\Sigma(\Sigma+h_d h_d^H)^{-1}h_d} \tag{5}$$

Sherman-Morrison 공식을 따르면 [4], $(\Sigma+h_d h_d^H)$ 의 역행렬은

$$(\Sigma+h_d h_d^H)^{-1}=\Sigma^{-1}-\frac{\Sigma^{-1}h_d h_d^H\Sigma^{-1}}{1+h_d^H\Sigma^{-1}h_d} \tag{6}$$

이다. $\Sigma_h=h_d^H\Sigma^{-1}h_d$ 로 하면, (6)은

$$SINR=\frac{\Sigma_h^2}{\Sigma_h}=\Sigma_h=h_d^H\Sigma^{-1}h_d \tag{7}$$

이 된다. 이는 지정된 채널 정보가 포함됨과 관계 없이 (4)의 선형 MMSE 수신기가 기존 MMSE 수신기 SINR 의 최대값을 얻을 수 있음을 보여준다. 제안된 수신기의 샘플 공분산 행렬은 $\hat{\Sigma}_d=\hat{\Sigma}+h_d h_d^H$ 이 된다. $\hat{\Sigma}_d$ 를 이용한 SINR 은

$$SINR_{prop}=\frac{(h_d^H\hat{\Sigma}_d^{-1}h_d)^2}{h_d^H\hat{\Sigma}_d^{-1}\Sigma\hat{\Sigma}_d^{-1}h_d} \tag{8}$$

이고, 이에 따른 기대값은

$$E_{\hat{\Sigma}_d}\left[\frac{(h_d^H\hat{\Sigma}_d^{-1}h_d)^2}{h_d^H\hat{\Sigma}_d^{-1}\Sigma\hat{\Sigma}_d^{-1}h_d}\right]=\left(1-\frac{N-1}{M+1}\right)h_d^H\Sigma^{-1}h_d \tag{9}$$

이 된다. 그러나 수신신호의 자기 상관인 R_{yy}^{-1} 의 존재가 항상 보장되지 않기 때문에 대체적인 비모수 선형 MMSE 필터를 제안한다. (6)으로부터 $v_d^H=(1+\Sigma_h)^{-1}h_d^H\Sigma^{-1}$ 임을 알 수 있다. 고유값 분해를 사용하면 v_d^H 는 다음과 같이 표현된다.

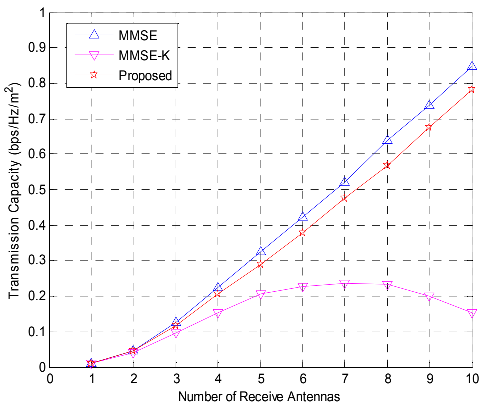
$$v_d^H=(h_d^H\hat{R}_{yy}^{+}h_d)^{-1}h_d^H\hat{R}_{yy}^{+} \tag{10}$$

여기서 $\hat{R}_{yy}$ 는 수신신호 집합 $Y=[y_1,y_2,\ldots,y_M]$ 로부터 얻은 샘플 상관 행렬이다. 기존의 불완전한 채널상태정보를 가진 MMSE 수신기와 비교해보면 K 는 패킷 단위로 전송시의 전송 용량을 감소시키는 부하인 반면 (9)의 M 은 패킷 길이의 범위 안에서 자유롭게 선택 될 수 있다. 패킷 길이는 보통 수백이 넘기 때문에 $\hat{R}_{yy}$ 을 이용하는 SINR 기대값과 전송 용량이 $\hat{\Sigma}$ 을 사용했을 때보다 크다.

4. 모의실험 결과

제안된 기법의 성능을 살펴보기 위해 모의실험을 수행하였다. 그림 1 에 수신 안테나수 N 증가에 따른 전송 용량을 나타내었다. 제안한 수신기가 완전한 채널상태정보를 가진 MMSE 수신기에 비해 성능열화가 있지만 K 샘플 공분산 행렬을 이용하는 MMSE 수신기에 비해서는 수신 안테나수가 증가할수록 성능 이득을 가져온다. 본 논문에서는 간섭 단말들의 채널 상태 정보가 불완전한 조건에서 최적의 MMSE 수신기의 상당한 전송 용량을 얻을 수 있는 기법을 제안하였다. 샘플 공분산 행렬을 추정하는 기간 동안에 전송 손실이 상당히 일어나는 사실에 착안하여 제안한 비모수 선형 MMSE 수신기는 지정된 채널 정보를 포함하여 데이터 수신을 동시에 가능하도록 하였다. 전송 용량 모의 실험 결과를 실제적인 무선 애드혹 네트워크 시스템에서 제안된 기법이 상당한 전송 용량 이득을 얻는 것을 보였다.

그림 1. 수신 안테나수 N 에 따른 전송 용량



$(\varepsilon=0.1,\beta=1,\alpha=3,d=1)$

참고문헌

[1] N. Jindal, J.G. Andrews, and S. Weber, " Multi-antenna communication in ad hoc networks: achieving MIMO gains with SIMO transmission" , *IEEE Trans. Comm.* vol. 59, no. 2, pp.529-540. Feb. 2011

[2] S. Weber, J.G. Andrews, and N. Jindal, " An overview of the transmission capacity of wireless networks" , *IEEE Trans. Comm.* vol. 58, no.12, pp.3593-3604. Dec. 2011.

[3] I. Reed, J. Mallet, and L. Brennan, " Rapid c onvergence rate in adaptive arrays" , *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.* vol.10, no. 6, pp.853-863. Nov. 1974.

[4] S.M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing Estimation Theory*, Prentice Hall, 1998.