

무선 애드혹 네트워크에서의 간섭 제어 채널 추정 기법

이병주, 박선호, 심병호
고려대학교

{bjlee, shpark}@isl.korea.ac.kr, bshim@korea.ac.kr

Interference Aware Channel Estimation for Wireless Ad Hoc Networks

Byungju Lee, Sunho Park, Byonghyo Shim
Korea University

요 약

본 논문에서는 간섭 제한 적인 상황에서 지정된 채널을 추정해야 하는 실제적인 무선 애드혹 네트워크에서 비모수 선형 MMSE 필터 기반의 간섭 제어 채널 추정 기법을 사용하여 네트워크 성능을 개선시키는 새로운 기법을 제안한다. 제안하는 채널 추정 기법은 간섭의 정도에 따라 노드를 활성화 시키고 지정된 채널 추정을 한다. 실제적인 무선 애드혹 네트워크 모의실험을 통해 제안된 기법이 기존의 채널 추정 기법에 비해 상당한 전송 용량 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

1. 서론

최근 들어 애드혹 네트워크라고 불리는 탈집중 무선 네트워크가 다중 홉 방송망, 개인 통신망, 사물지능통신(M2M)과 같은 차세대 통신 시스템의 인프라로서 많은 주목을 받고 있다. 무선 애드혹 네트워크는 다수의 송신-수신 쌍들이 기지국과 같은 고정된 기반 없이 동시에 통신하는 네트워크를 지칭한다. 다수의 송신 노드가 동시에 데이터를 전송할 때 송신기간 간섭이 상당히 많이 발생하기 때문에, 수신단에서 간섭신호를 다루는 기법이 많은 관심을 얻고 있다 [1]. 최근에 간섭신호들의 채널상태정보가 없는 조건에 대해 샘플 공분산 행렬과 수신신호의 자기상관을 이용하는 수신 기법들이 제안되었다[2, 3]. [2]에서는 간섭신호들만의 전송을 관측하여 공간적 공분산 행렬을 얻었다. [3]에서는 비모수 공분산에 기반한 MMSE 방식의 기법이 제안되었다. 이 기법에서는 간섭신호들의 채널정보가 주어지지 않을 때에도 수신 안테나 수에 비례하는 전송 용량을 얻는 것을 보였다. 하지만 이 기법들에서는 지정된 채널 추정에 대해서 피상적으로 다루었다.

본 논문에서는 수신단이 간섭 제한적인 상황에서 지정된 채널 정보를 추정해야 하는 보다 더 실제적인 시나리오에서 간섭 제어 채널 추정 기법을 제안한다. 대부분의 수신 알고리즘들에서는 간섭은 잡음으로 간주되고 간섭의 세기가 클 때, 추정된 채널의 성능과 SINR 은 낮아진다. 간섭 채널 추정 기법은 간섭의 정도에 따라 노드를 활성화 시키고 지정된 채널 추정을 한다. 즉, 노드의 활성화와 채널 추정은 측정된 간섭이 미리 정해진 임계값보다 낮을 때만 수행된다. 그렇게 하면서, 활성화된 노드 쌍들의 SINR 이 향상되고, 전송 용량의 향상을 가져온다. 모의실험을 통하여 제안하는 기법이 기존의 채널 추정 기법에 비해 상당한 전송 용량 이득을 얻는 것을 보인다.

2. 비모수 선형 MMSE 기반의 간섭 제어 채널 추정 기법

무선 애드혹 네트워크의 N-차원 수신신호 벡터는

$$\mathbf{y} = d_0^{-\alpha/2} \mathbf{h}_0 s_0 + \sum_{i \in \Lambda(\lambda) \setminus \{Tx_0\}} |d_i|^{-\alpha/2} \mathbf{h}_i s_i + \mathbf{w} \quad (1)$$

로서 \mathbf{y} 는 수신신호 열 벡터, d_0 와 $|d_i|$ 는 지정된 송신-수신기간 거리와 i 번째 송신기와 지정된 수신기간 거리, α 는 경로 손실 지수 ($\alpha > 2$), \mathbf{h}_0 와 \mathbf{h}_i 는 지정된 송신기와 i 번째 송신기의 채널 벡터, s_i 는 i 번째 송신기에서 전송된 심볼 ($E[|s_i|^2] = \rho$), λ 는 단위 면적당 간섭 송신기 수 (interferers / m^2), \mathbf{w} 는 공분산 행렬 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 를 가진 추가적인 백색 가우시안 잡음 (AWGN)이다. 단위 놈 수신 필터 \mathbf{v}_0 를 이용하면, 추정된 심볼은 $\hat{s}_0 = \mathbf{v}_0^H \mathbf{y}$ 이 되고 신호대간섭잡음비 (SINR)은

$$SINR = \frac{\rho d_0^{-\alpha} \mathbf{v}_0^H \mathbf{h}_0 \mathbf{h}_0^H \mathbf{v}_0}{\mathbf{v}_0^H (\sigma^2 \mathbf{I} + \rho \sum_{i \in \Lambda(\lambda) \setminus \{Tx_0\}} |d_i|^{-\alpha} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H) \mathbf{v}_0} \quad (2)$$

이 된다. SINR 임계값 β 에서의 오수신 확률은 $P_{out}(\lambda) = P[SINR \leq \beta]$, 최대 간섭 송신기 밀도는 $\lambda_\epsilon = \max_{\lambda} \{\lambda : P_{out}(\lambda) \leq \epsilon\}$ 여기서 ϵ 는 오수신 제한, 그리고 애드혹 네트워크의 전송 용량은

$C(\varepsilon) = \lambda_\varepsilon (1 - \varepsilon) \log_2(1 + \beta)$ bps/Hz/m² 이다 [2].

비모수 기반의 선형 MMSE 에서의 지정된 심볼의 추정은

$$\hat{s}_0 = \mathbf{v}^H \mathbf{y} = \mathbf{R}_{s_0 y} \mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{y} = d_0^{-\alpha/2} \mathbf{h}_0^H (\Sigma + \mathbf{h}_0 \mathbf{h}_0^H)^{-1} \mathbf{y} \quad (3)$$

이고 여기서 $\Sigma = \sigma^2 + \rho \sum_{i \in \Lambda(\lambda) \setminus \{Tx_0\}} |d_i|^{-\alpha} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H$ 는 간섭과

잡음의 공간적 공분산이다 [3]. 수신단이 지정된 채널을 추정해야 하는 시나리오에서 수신신호의 자기 상관을 이용하는 비모수 기반의 선형 MMSE 에서의 공분산은

$$\hat{\Sigma}_0 = \hat{\Sigma} + \hat{\mathbf{h}}_0 \hat{\mathbf{h}}_0^H \quad (4)$$

이고 수신 필터는 $\mathbf{v}_0 = \hat{\Sigma}_0^{-1} \hat{\mathbf{h}}_0$ 이 된다. 제안하는 간섭 제어 추정 기법은 간단한 임계값을 도입하여 수신단에서 측정된 간섭 세기에 따라 노드를 활성화시키고 채널 추정을 수행한다. 제안된 기법은 수신단에서의 측정된 간섭 세기 I 가 임계값 γ 보다 작을 때에만 채널 추정을 위한 파일럿 심볼 전송을 요구한다. I 가 γ 보다 클 때에는, 수신단은 비활성 상태를 유지하고 다음 슬롯이 시작할 때 간섭 세기를 다시 측정한다. 제안된 기법에서는 간섭 제어에 따라 딜레이가 발생하게 된다. 따라서 간섭 제어 채널 추정으로 생기는 딜레이를 분석하고 딜레이가 반영된 전송 캐패시티를 정의한다.

각 노드가 고정된 역세스 확률 P_a 로 데이터 심볼을 전송할 때 수신 신호는

$$\mathbf{y}' = d_0^{-\alpha/2} \mathbf{h}_0 s_0 + \sum_{i \in \Lambda(\lambda) \setminus \{Tx_0\}} \eta_i |d_i|^{-\alpha/2} \mathbf{h}_i s_i + \mathbf{w} \quad (5)$$

이고 여기서 η_i 는 베르누이 랜덤 변수이다 (P_a 의 확률로 $\eta_i = 1$, $1 - P_a$ 의 확률로 $\eta_i = 0$). 간섭 세기 I 는

$$I = \rho \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i |d_i|^{-\alpha} \|\mathbf{h}_i\|^2 \quad \text{이 되고 노드가 비활성화될}$$

$$\text{확률은 } P_D = P[I \geq \gamma] = P[\rho \sum_{i=1}^{\infty} \eta_i |d_i|^{-\alpha} \|\mathbf{h}_i\|^2 \geq \gamma]$$

이 된다. 단위 전송 파워 ($\rho = 1$), $E[\|\mathbf{h}_i\|^2] = N$, 그리고 마르코프 부등식을 이용하면 임계값 γ 에 따른 비활성 확률은

$$P_D \leq 1 + \exp \left(-P_a \lambda \left(\frac{N}{\gamma} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \right) \left(\frac{2P_a \lambda \pi \left(\frac{N}{\gamma} \right)^{\frac{2}{\alpha}}}{\alpha - 2} - 1 \right) \quad (6)$$

이 된다. 마지막으로, 딜레이가 반영된 효과적인 전송 캐패시티는

$$C_{eff} = \frac{T_\tau}{T_D + T_\tau} \lambda^* (1 - \varepsilon) \log_2(1 + \beta) \quad (7)$$

이 되고 여기서 T_τ 는 데이터 전송 시간이고, T_D 는 간섭 제어 채널 추정과 관련된 패킷 딜레이 시간이다.

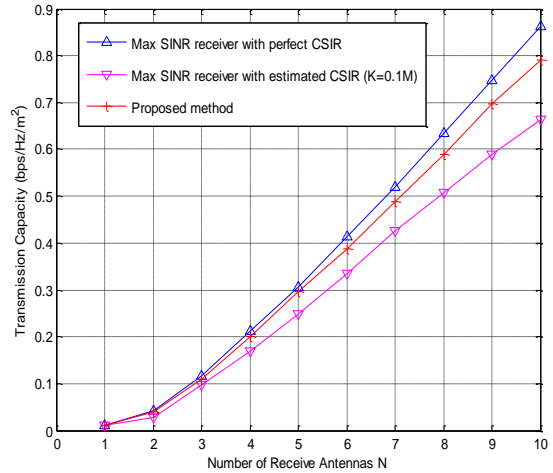


그림 1. 수신 안테나수 N 에 따른 효과적인 전송 캐패시티

3. 모의실험 결과

제안된 기법의 성능을 살펴보기 위해 모의실험을 수행하였다. 모의실험에서는 송신 노드들이 2-D PPP 제공 거리로 분포되어 있다고 가정한다. SINR 과 Outage 확률은 최대 밀도를 결정하기 위해 수천 번 반복 수행된다. 각각의 송신 채널 벡터의 요소들은 서로 독립적이며, 동일한 분포를 따르는 평균이 0 이고 단위 분산을 갖는 복소 가우시안 확률 변수들이라고 가정한다. 그림 1 에 수신 안테나수 N 증가에 따른 효과적인 전송 캐패시티를 나타내었다. 제안된 기법은 지정된 채널과 간섭신호들의 채널정보를 모두 아는 max SINR 수신단에 비해 성능열화가 있지만 8% 이내의 전송 손실만을 가져온다. 그리고 제안된 기법은 간섭 제어가 없는 기존의 채널 추정 기법에 비하여 10~20%의 전송 캐패시티 성능이득을 가져온다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래부가 지원한 2013 년 정보통신방송(ICT) 연구개발사업과 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2012R1A2A2A01047510)

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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
- [3] S. Park, B. Lee, J. Wang, and B. Shim, " An efficient linear MMSE receiver for wireless ad hoc networks", *Proc. Of IEEE Intl. Conf. Commun. (ICC)*, Ottawa, Canada, June 2012.