

불완전한 채널 상태 정보를 이용한 지연 제한 채널 용량에 관한 연구

이두호, 김광순, *강일우, *정민아, **송익호, *이성로
연세대학교, *목포대, **한국과학기술원

dh.rhee@yonsei.ac.kr, ks.kim@yonsei.ac.kr

A Study on the delay-constrained capacity with imperfect CSI

Duho Rhee and Kwang Soon Kim
Yonsei University

요약

해양 통신 환경에서는 채널이 열악하므로 주어진 데이터를 여러 시간 블록에 걸쳐 전송을 함으로써 점대점(point-to-point) 채널 용량을 늘릴 수 있다. 본 논문에서는 지연 제한이 있는 시스템에서 채널 상태 정보에 불확실성이 있을 때의 채널 용량에 대해 알아본다. 수신단에서는 채널 상태 정보(CSI)와 채널 출력 정보(COI)를 송신단으로 보낸다. 먼저 채널 상태 정보가 완벽할 때의 채널 용량에 대해 알아보고 불확실성이 있을 때의 성능 열화를 알아본 후, 이 때의 채널 용량을 얻는 최적 전력 할당 기법을 제시하고 성능을 분석하였다.

I. 서론

해양 통신 환경에서는 셀룰러 시스템에 비해 채널 상황이 열악하므로, 주어진 데이터를 여러 시간 블록에 걸쳐 전송함으로써 점대점 채널 용량을 늘릴 수 있다. 완벽한 채널 상태 정보(channel state information; CSI)가 매 블록마다 피드백되는 시스템의 지연 제한 채널 용량에 대해서 기존에 몇몇 연구가 진행되었다.[1-2] 모든 블록의 채널 상태 정보를 미리 다 알 수 있으면 최적의 전력 할당 기법은 water-filling 이고 이 때의 채널 용량을 수식으로 정리할 수 있다. 하지만 현재 블록의 채널 상태 정보만을 피드백 받는 경우, 최적의 전력 할당 기법은 dynamic programming[3] 기법으로 찾아야 하고 이 때의 채널 용량은 closed-form 으로는 얻을 수 없다.[1] 이렇게 구한 전력 할당 기법을 채널 상태 정보에 오차가 있는 경우에 그대로 적용하면 성능 열화가 생기고, 오차가 커질수록 열화 정도도 커지게 된다. 본 논문에서는 채널 상태 정보가 완벽하지 않은 경우의 최적 전력 할당 기법을 dynamic programming 기법에 의해 찾고 성능을 분석하였다.

II. 본론

본 연구에서 가정하는 채널은 단일 경로 블록 페이딩 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널이다. 각 블록의 채널 h_n 은 i.i.d. (independent and identically distributed) 플랫 Rayleigh 페이딩을 가정한다.

송수신단은 다음과 같이 구성된다. 수신단에서는 채널 이득 $g_n = |h_n|^2$ 의 추정치 $\hat{g}_n = |\hat{h}_n|^2$ 을 채널 상태 정보(CSI)로 피드백 채널을 통해 송신단에 피드백하고, 피드백 채널에는 오류가 발생하지 않는다고 가정한다. 채널의 평균 전력 $E[g_n] = 1$ 이고, 잡음의 전력 N_0B 는

채널 이득에 반영되었다고 가정한다. 실제 채널과 추정치의 관계는 $h_n = \rho \hat{h}_n + w_n$ 라 가정하고 $\sigma_w^2 \triangleq E[|w_n|^2]$ 라 정의한다. 또한 현재 블록까지 수신된 MI (mutual information) $R^{(n)} \triangleq \sum_{i=1}^n \log(1 + P_i g_i)$ 을 채널 출력 정보(channel output information; COI)로 피드백한다.

송신단에서는 매 블록마다 피드백 받은 채널 상태 정보와 채널 출력 정보에 따라 송신 신호의 전력을 결정하고 Gaussian codebook을 이용해 송신하며, 이 때 평균 전력을 P_0 라 한다. 그리고 주어진 메시지에 대해 K -블록의 지연 제한(delay constraint)을 둔다. 따라서 KP_0 의 전력을 K 개의 블록에 분배하게 된다.

이러한 시스템 모델에서 지연 제한 채널 용량을 구하기 위해서 다음과 같은 최적화 문제를 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{minimize } & \Pr \left[\sum_{n=1}^K \log(1 + P_n(\hat{g}_n, R^{(n)}, P^{(n)})g_n) < KR_0 \right] \\ \text{s.t. } & P_n(\hat{g}_n, R^{(n)}, P^{(n)}) \geq 0, \\ & E \left[\sum_{n=1}^K P_n(\hat{g}_n, R^{(n)}, P^{(n)}) \right] \leq KP_0 \end{aligned}$$

여기서 $P^{(n)}$ 은 $(n-1)$ 번째 블록까지 송신하고 남은 전력을 나타내고, R_0 는 보내려는 신호의 전송률이다. 주어진 목표 전송률 R_0 에 대해 outage 확률이 목표 outage 확률 ϵ_0 가 되는 P_0 를 찾으려면, 이 전송률이 SNR (signal to noise ratio)이 P_0 일 때의 지연 제한 채널 용량이다.

이 최적화 문제의 해는 dynamic programming 기법으로 구할 수 있다.[1] 위 문제의 해를 얻기 위한 dynamic programming은 다음 수식 (1)과 같이 정의된다.

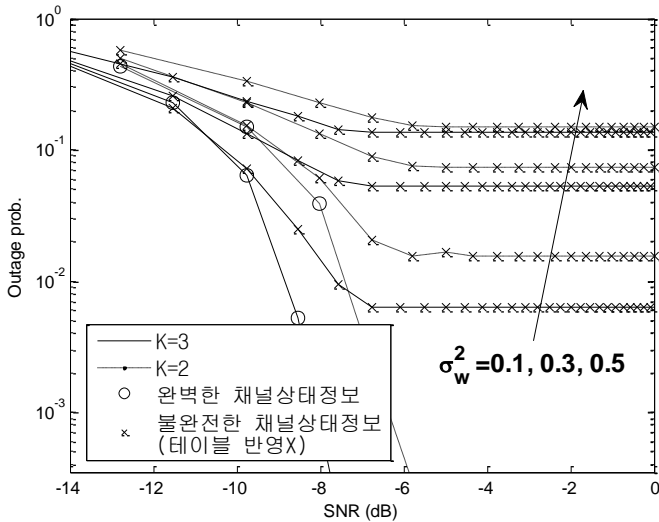


그림 1. 완벽한 채널 상태 정보를 이용할 때의 성능과 실제로는 오차가 있을 때의 성능 열화

$$c_n(R^{(n)}, P^{(n)}) = \min_{\substack{\mu_n(\hat{g}_n, R^{(n)}, Q^{(n)}) \\ Q^{(n)} \geq 0, E[Q^{(n)}] \leq P^{(n)}}} E_{g_n, \hat{g}_n} [c_{n+1}(R^{(n+1)}, P^{(n+1)})] \quad n = K, K-1, \dots, 1 \quad (1)$$

여기서, $R^{(n+1)} = R^{(n)} - \log(1 + \mu_n(\hat{g}_n, R^{(n)}, Q^{(n)}))$, $P^{(n+1)} = Q^{(n)}(\hat{g}_n, R^{(n)}, P^{(n)}) - \mu_n(\hat{g}_n, R^{(n)}, Q^{(n)})$ 이고, $c_{K+1}(R^{(n)}, P^{(n)}) = 1(R^{(K+1)} > 0)$ 이다. 이 문제를 $n = K$ 일 때부터 거꾸로 풀어가면서 μ_n 과 $Q^{(n)}$ 의 테이블을 생성함으로써 전력 할당 테이블을 얻는다. 목표 outage 확률을 얻도록 하려면, $n = 1$ 일 때 $c_1(KR_0, P^{(1)}) = \epsilon_0$ 를 만족하도록 μ_1 과 $Q^{(1)}$ 을 정하면 된다. 이렇게 얻어진 테이블을 이용해서 매 블록 피드백 정보를 가지고 다음 수식 (2)와 같이 전력을 할당한다.

$$\begin{cases} P_n(\hat{g}_n) = \mu_n(\hat{g}_n, R^{(n)}, Q^{(n)}) \\ P^{(n)} = Q^{(n-1)}(\hat{g}_{n-1}, R^{(n-1)}, P^{(n-1)}) - P_{n-1}(\hat{g}_{n-1}) \\ R^{(n)} = KR_0 - \sum_{i=1}^{n-1} \log(1 + P_i(\hat{g}_i)\hat{g}_i) \\ R^{(1)} \equiv KR_0 \text{ (initialization)} \end{cases}$$

채널 상태 정보에 오차가 없이 완벽한 경우, 수식 (1)에서 $\hat{g}_n = g_n$ 으로 바뀌어서 문제를 풀면 [1]의 결과를 얻는다. 다음 그림 1은 $R_0 = 0.1$, $K = 2, 3$ 일 때 이렇게 얻은 outage 확률과, 채널 상태 정보에 오차가 있지만 오차가 없을 때의 전력 할당 테이블을 그대로 사용했을 때의 outage 확률 성능을 SNR(= P_0)에 대해 그린 것이다. 먼저, 지연 제한이 커질수록 성능이 좋아지는 것을 알 수 있고, 채널 상태 정보에 오차가 생기면 성능이 나빠지며 오차의 정도가 커질수록 성능 열화의 정도가 커지는 것을 알 수 있다.

이제 수식 (1)을 \hat{g}_n 의 오차를 반영하여 풀면, 채널 상태 정보에 오차가 있을 때의 outage 확률 성능을 얻을 수 있다. 그림 2는 이 결과를, $K = 3$ 일 때 그림 1에서의 결과와 비교한 것이다. 채널 상태 정보에 오차가 있으므로, 오차가 없을 때에 비해 성능이 나빠지는 것은 당연하나, 오차를 감안한 최적 기법이므로, 오차를 감안하지 않은 테이블을 그대로 사용했을 때처럼 outage 확률의 floor가 생기지 않고 SNR이 증가함에 따라 계속 떨어지는 것을 볼 수 있다.

III. 결론

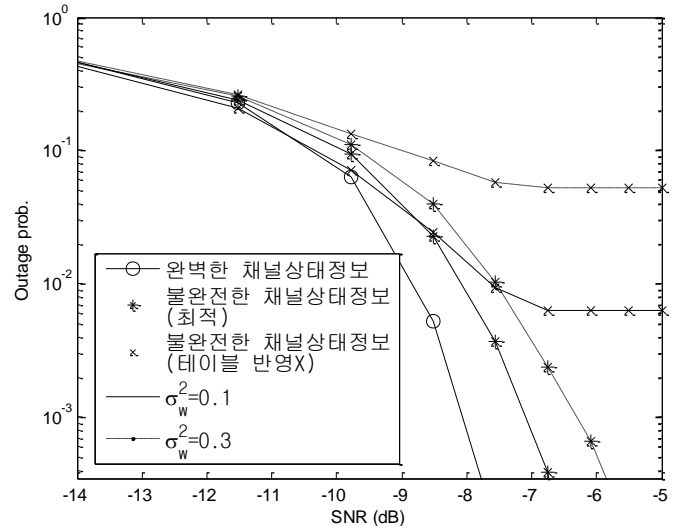


그림 2. 불완전한 채널 상태 정보를 감안한 최적 기법의 성능

본 논문에서는 채널 상태 정보에 불확실성이 있을 때의 지연 제한 채널 용량을 찾는 최적화 문제의 정의 및 해법을 제시하고 성능을 분석하였다. 해양 통신의 여러 문제를 푸는 과정에서 점대점 채널의 용량을 얻는 기법으로서 의미가 있을 것이다. 현재의 연구에서는 피드백 채널 용량에 제한이 없다고 가정했지만, 제한이 있는 시스템으로 확장하면 제한된 피드백 자원을 채널 상태 정보와 채널 출력 정보에 적절하게 분배하는 것이 새로운 문제로 대두된다. 따라서 이 때의 최적 또는 부최적 기법을 찾는 것이 보다 실질적인 문제가 될 것이고 현재 연구를 진행 중이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0029321).

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2011-C1090-1121-0007).

이 논문은 한국과학기술정보연구원 국가슈퍼컴퓨팅공동활용 체제구축 자원 지원에 의해 연구되었음.

참고 문헌

- [1] R. Negi and J.M. Cioffi, "Delay-constrained capacity with causal feedback," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, no. 9, pp. 2478-2494, Sep. 2002.
- [2] J. Chen and K.-K. Wong, "Communication with causal CSI and controlled outage," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 5, pp. 2221-2229, May 2009.
- [3] D.P. Bertsekas, *Dynamic Programming and Optimal Control*, 2nd ed., vol. 1, Athena Scientific, Belmont, U.S.A., 2000.