

시간 상관 채널에서 ARQ 시스템의 합 채널용량 향상을 위한 전력 할당 기법

박진현, 이재홍
서울대학교

jinhyunpark@snu.ac.kr, jhlee@snu.ac.kr

Power allocation for sum capacity enhancement of ARQ systems in time-correlated fading channels

Jinhyun Park Jae Hong Lee
Seoul National University

요 약

무선통신 환경에서 채널 용량이 증가하면 정해진 전송률에 대한 불능 확률(outage probability)이 감소하며, 따라서 통신의 신뢰도가 향상된다. 본 논문에서는 채널 페이딩에 대한 시간 상관성(time correlation)이 있는 환경에서 ARQ 시스템의 합 채널 용량을 향상시키는 전력 할당(power allocation) 기법에 대해 다룬다. 송신기에서 전송이 시작되기 전의 채널 정보를 수신기의 피드백을 통해 알고 있다고 가정하고, ARQ의 재전송 시점의 채널의 확률분포를 다루었다. 이 분포를 통해 재전송 시점의 채널을 추정하고, ARQ의 모든 재전송에 대한 합 채널 용량 최대화를 위한 전력 할당 문제를 공식화하였다. 이 문제에 대한 해를 분석적으로 도출하였으며, 모의실험 결과를 통해 제안된 전력 할당 기법으로 얻는 합 채널용량이 재전송 시 동일한 전송전력을 사용한 기존의 기법보다 증가함을 확인한다.

1. 서론

최근의 통신 환경은 갈수록 더 많은 데이터 전송량을 요구하는 데 비해, 사용할 수 있는 무선 자원은 한정되어 있다. 따라서 주어진 주파수와 전력 자원을 효율적으로 관리하여 더 많은 데이터를 보내게 하는 것은 최근 무선통신의 중요한 목표이다. 또한 무선 통신에서 갈수록 데이터가 차지하는 비중이 높아지기 때문에, 높은 신뢰도를 달성할 수 있는 통신 기술이 요구된다. 그 중 하나로, 기존에 다루어지던 ARQ 기법이 있다 [1]. 이 기법은 수신기에서 수신받은 패킷의 무결성을 검증한 뒤, 만일 패킷에 오류가 발생하였다면 이를 재전송하도록 하여 오류율을 낮추는 기법이다.

이런 ARQ 기법의 성능을 향상시키기 위해, HARQ(Hybrid ARQ) 기법이 제안되었다 [2]. HARQ 기법은 보내는 데이터 패킷을 오류 정정 부호(error correcting code)를 사용하여 부호화하여, 수신기에서 받은 데이터 패킷에 작은 오류가 발생하였다면 이를 오류 정정 부호를 사용하여 재전송 없이 복구하는 기법이다. 또한 패킷의 오류가 많아 재전송이 필요하더라도, 손상된 패킷을 버리지 않고 저장해 두었다가 재전송된 패킷과 결합하여 복호화를 시도하는 기법이 있다. 이를 연결합(soft combining) 기법이라고 한다.

이런 ARQ 및 HARQ 기법에서 전송률(transmission rate) 또는 전송 전력(transmission power)을 적응적으로 결정하여, 데이터 전송 효율을 최적화하기 위한 연구가 진행되고 있다. [3]에서는 주어진 전송 지연시간 요구조건(transmission delay constraint) 하에서 전송률과 전력을 적응적으로 할당하는 연구가 있었다. [4]에서는 재전송 시점마다 페이딩이 달라지는 채널에서 평균 사용 전력의 최소화를 위한 전력 할당 기법이 제안되었다. [5]에서는 재전송 시 동일한 페이딩을 겪는 채널에서 평균 사용 전력 최소화를 위한 전력 할당 기법이 다루어졌다. [6]에서는 재전송 시 채널 페이딩간의 상관성이 있는 환경에서 최적의 전송률을 적응적으로 결정하는 기법이 제안되었다.

본 논문에서는 채널 페이딩에 대한 시간 상관성(time correlation)이 있는 환경에서 첫 번째 전송 및 모든 재전송 시점에서의 합 채널 용량을 향상시키는 전력 할당 기법을 제안한다. 기존의 ARQ 전력 할당 기법은 상관 채널에서의 합 채널 용량을 고려하지 않았으며, incremental redundancy 방식의 연결합을 사용하는 HARQ 시스템에서 합 채널 용량이 향상되면 시스템의 불능 확률(outage probability)이 낮아지므로 신뢰도 측면의 향상이 이루어진다 [7].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 시스템 모델을 설정하고, 3 절에서는 합 채널용량을 향상하기 위한 최적화 문제를 설정한 후 분석적인 해를 도출한다. 4 절에서는 제안한 기법에 따라 전력을 할당하였을 때의 성능 향상 정도를 모의실험을 통해 확인하며, 마지막으로 5 절에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0001274, 2011-0017437).

2. 시스템 모델

이 논문에서는 송신기가 하나의 수신기와 통신하는 시스템을 고려하며, 이 시스템은 그림 1 과 같은 ARQ 프로토콜에 따라 데이터를 전송한다.

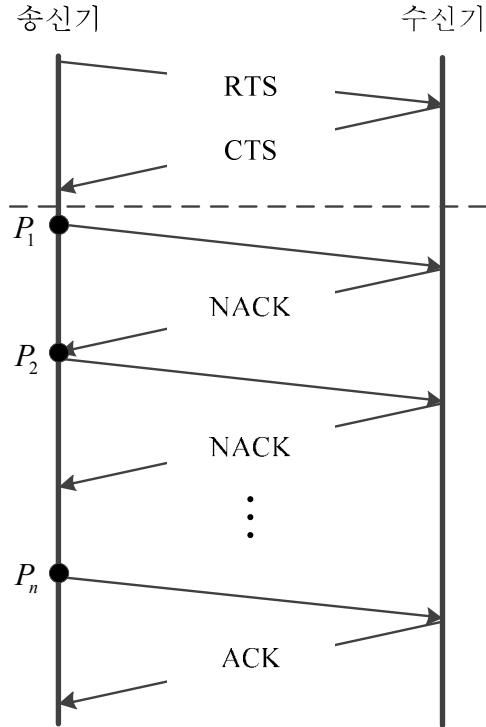


그림 1. 시스템 모델.

데이터 전송 전에 송신기에서는 수신기가 정보를 수신할 수 있는 상태인지 묻는 RTS(Request To Send) 패킷을 수신기에게 보낸다. 수신기가 정보 수신이 가능한 상태라면 그 응답으로 CTS(Clear To Send) 패킷을 송신기에게 보내며, 이 패킷에는 수신기가 추정한 채널 정보가 포함되어 있다. 송신기에서는 수신된 채널 정보에 따라 적절한 전송 전력 \$P_1\$ 을 할당하여 데이터를 전송한다. 수신기에서 수신한 데이터에 오류가 없다면 ACK 응답을 송신기에게 보내며, 그렇지 않다면 NACK 응답을 보낸다. 송신기에서는 전송 전력 \$P_2, P_3, \dots\$ 을 사용하여 수신기에서 ACK 응답을 받거나 재전송 횟수가 미리 정해진 최대 재전송 횟수 \$N\$ 에 도달할 때까지 같은 데이터를 재전송하게 된다.

이 시스템에서 ARQ 프로토콜에 따라 데이터 \$x\$ 를 (재)전송할 때 \$n\$ (\$n=1, 2, \dots, N+1\$) 번째로 수신된 신호 \$y_n\$ 은 다음과 같다.

$$y_n = \sqrt{P_n} h_n x + w_n. \quad (1)$$

\$h_n\$ 은 데이터를 \$n\$ 번째로 재전송하는 시점에서의 채널 계수이며, 다음과 같이 주어진다.

$$h_n = \sqrt{G_{PL}} h_{f,n}. \quad (2)$$

\$G_{PL}\$ 은 경로손실 계수이며, 이 값은 송신기와 수신기 사이의 거리 및 전송 채널의 특성에 따라 결정된다. \$h_{f,n}\$ 은

채널 페이딩 계수이며 복소 가우시안 랜덤 분포를 따르는 확률 변수이다. 즉, \$h_{f,n} \sim \text{CN}(0, \sigma^2)\$ 이며, \$\sigma^2\$ 은 채널의 분산을 가리킨다. \$w_n\$ 은 복소 가산 백색 가우시안 잡음(complex additive white Gaussian noise) 으로 평균은 0 이고 분산은 \$\sigma_w^2\$ 이다.

채널 페이딩 계수 \$h_{f,n}\$ 은 시간에 따른 상관성이 있으며 [6], 시간차에 대한 지수적 상관 모델을 적용할 수 있다. [8] 지수적 상관 모델에 따르면, \$n\$ 번째 (재)전송 시점과 \$n+1\$ 번째 재전송 시점간의 차이를 \$\tau\$ 라고 하면 두 시점간의 채널 상관계수는 \$\rho^\tau\$ 가 된다. 여기서 \$\rho = J_0(2\pi f_d t)\$ 인데, \$J_0(\cdot)\$ 은 제 1 종 0 차 베셀 함수(Bessel function of the first kind and order 0), \$f_d\$ 는 도플러 주파수, \$t\$ 는 상관계수 추정을 위한 샘플링 시간을 가리킨다.

송신기에서 받은 CTS 패킷을 통해 추정된 채널 정보가 완벽하다고 하자. 이 값을 \$h_{f,0}\$ 이라고 하고, 이 채널 정보가 적용되는 시점과 1 번째 데이터 전송 시점간의 시간차를 \$\tau\$ 라고 하면 \$n\$ 번째 (재)전송 시점의 채널 \$h_{f,n}\$ 는 \$h_{f,0}\$ 에 영향을 받는 확률변수이다. \$h_{f,0}\$ 이 결정되었을 때의 \$h_{f,n}\$ 을 \$\tilde{h}_{f,n}\$ 으로 표기하자. 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [6].

$$\tilde{h}_{f,n} = \rho^{n\tau} h_{f,0} + \sqrt{1 - \rho^{2n\tau}} w_n. \quad (3)$$

따라서 \$h_{f,0}\$ 이 주어졌을 때 \$\tilde{h}_{f,n}\$ 에 대한 확률분포는 다음을 따른다 [9].

$$\tilde{h}_{f,n} \sim \text{CN}(\rho^{n\tau} h_{f,0}, \sigma^2(1 - \rho^{2n\tau})). \quad (4)$$

3. 합 채널용량 향상을 위한 전력할당 기법

최적 전력 할당 문제를 공식화하기 위해, \$n\$ 번째 (재)전송 시점의 수신 신호대잡음비(received SNR)를 구하면 다음과 같다.

$$\text{SNR}_n = \frac{G_{PL} |h_{f,n}|^2 P_n}{\sigma_w^2}. \quad (5)$$

따라서 \$n\$ 번째 (재)전송 시점의 채널용량은

$$\log_2(1 + \text{SNR}_n) = \log_2\left(1 + \frac{G_{PL} |h_{f,n}|^2 P_n}{\sigma_w^2}\right) \quad (6)$$

이며, 이 장에서 풀고자 하는 합 채널용량 최대화 문제는 다음과 같이 공식화할 수 있다.

$$\underset{P_n}{\text{maximize}} \sum_{n=1}^{N+1} \log_2\left(1 + \frac{G_{PL} |h_{f,n}|^2 P_n}{\sigma_w^2}\right), \quad (7)$$

$$\text{subject to } P_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N+1, \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^{N+1} P_n \leq P_{TH}. \quad (9)$$

이 문제의 목적함수 (7)은 오목함수(concave function)이며, 제한조건 (8)과 (9)는 아핀함수(affine function)이다. 따라서 이 최대화 문제는 컨벡스 최적화(convex optimization) 문제이며, 이를 풀기 위한 여러 방법이 존재한다 [10], [11]. 하지만 이 문제를 풀기 위해서는 n 번째 (재)전송 시점의 채널 $|h_{f,n}|^2$ 을 알아야 하는데, 이는 불가능하다. 따라서 이 문제를 $h_{f,0}$ 을 알 때 평균 채널용량의 합을 최대화하는 문제로 바꾸면, (7)의 목적함수는 다음과 같이 대체된다.

$$\sum_{n=1}^{N+1} E \left[\log_2 \left(1 + \frac{G_{PL} |\tilde{h}_{f,n}|^2 P_n}{\sigma_w^2} \right) \right] \quad (10)$$

이 식 역시 채널의 분포가 복잡하면 닫힌 형태의 해를 구하기 매우 어렵다. 문제를 단순화하기 위해 채널을 평균값 $E[|\tilde{h}_{f,n}|^2]$ 으로 고정하면, (10)은 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\sum_{n=1}^{N+1} \log_2 \left(1 + \frac{G_{PL} E[|\tilde{h}_{f,n}|^2] P_n}{\sigma_w^2} \right) \quad (11)$$

(11)은 (10)의 상계이며, 이를 (10)에 대한 근사식으로 사용할 수 있다 [12].

(4)에서 주어진 $\tilde{h}_{f,n}$ 의 통계적 특성에 의해, $|\tilde{h}_{f,n}|^2$ 은 자유도가 2 인 비중심 카이제곱(noncentral Chi-square) 분포를 따르며, 그 확률밀도 함수는 다음과 같다 [6], [13].

$$f_{|\tilde{h}_{f,n}|^2}(x) = \frac{1}{2\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{s^2+x}{2\sigma_n^2}\right) I_0\left(\frac{s}{\sigma_n^2} \sqrt{x}\right) \quad (12)$$

이 식에서 s^2 는 $\tilde{h}_{f,n}$ 의 실수부와 복소부의 평균의 제곱의 합이며, $s^2 = \rho^{2nr} |h_{f,0}|^2$ 이다. 분산 σ_n^2 은 $h_{f,n}$ 의 실수부 또는 복소부의 분산이며, $\sigma_n^2 = \frac{\sigma^2(1-\rho^{2nr})}{2}$ 이다. $I_0(\cdot)$ 은 제 1 종 0 차 변형 베셀 함수(modified Bessel function of the first kind and order 0)이다 [13].

비중심 카이제곱 분포의 성질에 따라, $|\tilde{h}_{f,n}|^2$ 의 평균은 다음과 같이 주어진다.

$$E[|\tilde{h}_{f,n}|^2] = 2\sigma_n^2 + s^2 = \rho^{2nr} (|h_{f,0}|^2 - \sigma_n^2) + \sigma_n^2 \quad (13)$$

이 식에는 랜덤한 요소가 없으므로, 이 식을 (11)에 대입하면 컨벡스 최적화를 통해 풀 수 있는 목적 함수가 얻어진다.

위의 최적화 문제를 라그랑지안 듀얼(Lagrangian dual) 방법을 통해 재정의하면 다음과 같다.

$$-\sum_{n=1}^{N+1} \log_2 \left(\frac{G_{PL} E[|\tilde{h}_{f,n}|^2] P_n}{\sigma_w^2} \right) - \sum_{n=1}^{N+1} \nu_n P_n + \lambda \left(\sum_{n=1}^{N+1} P_n - P_{TH} \right), \quad (14)$$

위 식에서 ν_n 과 λ 은 라그랑지 승수를 가리킨다. 이 문제를 풀기 위해 KKT 조건을 적용하면 [10], [11], 다음의 전력 할당 해를 얻는다.

$$P_n = \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{\sigma^2}{\rho^{2nr} (|h_{f,0}|^2 - \sigma_n^2) + \sigma_n^2} \right)^+ \quad (15)$$

여기에서 $(\square)^+ = \max(0, \square)$ 을 의미하며, λ 은 전력 합의 제한조건

$$\sum_{n=1}^{N+1} P_n = P_{TH} \quad (16)$$

를 만족하게 하는 값이다. 이 결과는 다중 안테나 시스템에서 사용하는 최적 전력 할당 기법인 워터필링(waterfilling) 기법이 시간축 상에서의 다중 채널에 도입된 것이다.

4. 모의실험 결과

모의실험 환경은 다음과 같은 3GPP 환경에서의 경로손실 모델을 도입하였다 [10].

$$10 \log_{10} G_{PL} = -15.3 - 37.6 \log_{10} d \quad (17)$$

여기에서 송신기와 수신기 사이의 거리 d 는 1m 로 설정하였다. 채널의 분산 $\sigma^2 = 1$ 로 가정하였고, 복소 가산 백색 가우시안 잡음의 분산 $\sigma_w^2 = 1$ 로 가정하였다. 상관계수 $\rho = 0.8$, 전송 시점간의 시간차 $\tau = 1$ 로 설정하였다.

그림 2 에서는 총 전송 전력 P_{TH} 을 10dB 로 고정했을 때 최대 재전송 횟수 N 이 달라짐에 따라, 제안된 기법으로 전력을 할당한 경우와 재전송 시 동일 전력을 사용했을 때(equal power allocation)의 합 채널용량을 비교한다.

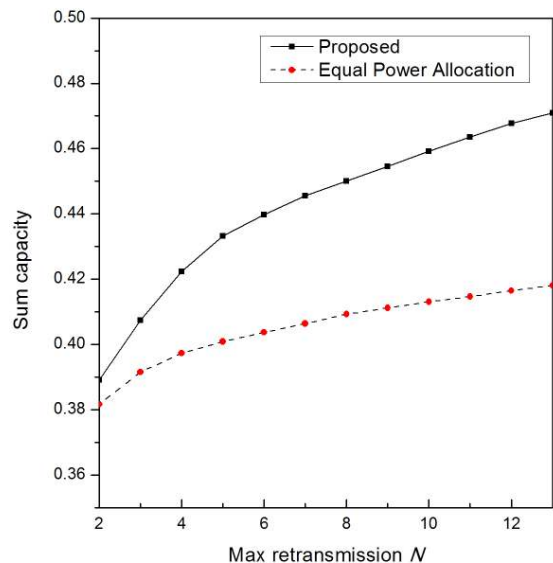


그림 2. 최대 재전송 횟수에 따른 채널 용량 비교.

그림 2는 최대 재전송 횟수가 높을수록 제안된 기법과 동일 전력을 사용한 경우 모두 합 채널 용량이 향상됨을 보인다. 이는 채널 용량이 전송전력에 대한 오목함수(concave function)이므로, 전체 전송전력을 한 번에 보내는 것보다 여러 번에 걸쳐 나누어 보낼 때 채널 용량이 향상됨에 기인한다. 그리고 제안된 기법이 동일 전력 사용 기법에 비해 더 큰 합 채널 용량을 달성하는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 최대 재전송 횟수가 11일 때 합 채널 용량이 12% 정도 증가되었다. 최대 재전송 횟수 N 이 커질수록 두 기법간의 합 채널 용량 차가 커지는데, 이는 최적화하는 전력 변수가 많아짐에 따라 제안된 기법의 효율성이 높아지기 때문이다. 그러나 N 이 커지면 시스템의 지연 시간이 증가하므로, 시스템 설계자는 재전송 횟수에 따른 합 채널 용량의 이득과 지연 시간의 제한 조건을 고려하여 적절한 N 을 설정해야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 시간 상관 채널에서 ARQ 시스템의 합 채널용량 향상을 위한 전력 할당 기법을 제안하였다. 컨벡스 최적화 기법에 따라, 추정된 채널을 토대로 각 재전송 시점에서의 최적 전력값을 계산하였다. 모의실험 결과를 통해, 제안된 기법이 기존의 동일 전력 할당 기법에 비해 합 채널 용량이 의미 있는 정도로 향상됨을 확인하였으며, 최대 재전송 횟수 N 이 커짐에 따라 합 채널 용량의 이득도 커짐을 확인하였다.

참고문헌

- [1] S. Lin and D. J. Costello, Jr., *Error control coding: fundamentals and applications*, 2/e. Pearson Prentice-Hall, 2004.
- [2] R. Comroe and D. Costello, Jr., "ARQ Schemes for data transmission in mobile radio systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 2, no. 4, pp. 472-481, Jul. 1984.
- [3] A. K. Karmokar, D. V. Djonin, and V. K. Bhargava, "Delay constrained rate and power adaptation over correlated fading channels," *Proc. IEEE Globecom 2004*, Dallas, TX, Nov. 2004.
- [4] H. Liu, L. Razoumov, N. Mandayam, and P. Spasojević, "An optimal power allocation scheme for the STC hybrid-ARQ over energy limited networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 12, Dec. 2009.
- [5] W. Su, S. Lee, and D. A. Pados, "The optimal transmission power per round for hybrid-ARQ Rayleigh fading links," *Proc. IEEE ICC 2010*, Cape Town, South Africa, May 2010.
- [6] S. M. Kim, W. Choi, T. W. Ban, and D. K. Sung, "Optimal rate adaptation for hybrid ARQ in time-correlated Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 3, pp. 968-979, Mar. 2011.
- [7] P. Wu and N. Jindal, "Performance of hybrid-ARQ in block fading channels: a fixed outage probability analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 4, pp. 1129-1141, Apr. 2010.
- [8] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital communication over fading channels*, John Wiley & Sons, 2000.
- [9] J. L. Vicario, A. Bel, J. A. Lopez-Salcedo, and G. Seco, "Opportunistic relay selection with outdated CSI: outage probability and diversity analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 2872-2876, Jun. 2009.
- [10] B. G. Lee, D. Park, and H. Seo, *Wireless communications resource management*, IEEE Press, 2009.
- [11] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*, Cambridge university press, 2004.
- [12] G. Farhadi and N. C. Beaulieu, "Ergodic capacity of multi-hop wireless relaying systems in Rayleigh fading," *Proc. IEEE Globecom 2008*, New Orleans, LA, Dec. 2008.
- [13] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*, 5th ed, McGraw-Hill, 2008.