

# 계층변조를 사용하는 릴레이 통신 시스템의 성능 분석

\*전민철 \*\*서보석

충북대학교 전자공학과

\*polarlights1@cbnu.ac.kr

## Performance Analysis of Relay Communication Systems with Hierarchical Modulation

\*Jeon, Min-Cheol \*\*Seo, Bo-Seok

Chungbuk National University

### 요약

본 논문에서는 계층변조를 적용하는 릴레이 통신 시스템의 성능을 분석한다. 릴레이 통신 시스템의 전송은 릴레이(relay station)의 사용으로 인해 두 개의 시간 슬롯이 필요하다. 첫 번째 시간 슬롯에서는 소스에서 변조된 신호를 릴레이와 목적지로 동시에 전송한다. 릴레이는 수신된 신호를 복조하고 재 변조하여 두 번째 시간 슬롯동안 재 변조된 신호를 목적지로 전송한다. 소스는 소스-릴레이 링크와 소스-목적지 링크의 서로 다른 채널 SNR(signal-to-noise power ratio)에 맞추기 위해 계층변조를 사용한다. 계층변조를 사용하는 릴레이통신 시스템의 BER(bit error rate)은 계층변조 파라미터의 값에 의해 달라진다. 본 논문에서는 BER과 계층변조 파라미터와의 관계를 유도하고, 모의실험을 통해 최소 BER을 얻을 수 있는 최적의 계층변조 파라미터를 찾아낸다.

### 1. 서론

최근 무선 통신 시스템에서 셀 커버리지 확대와 스펙트럼 효율을 늘리기 위해 릴레이(relay station)가 사용되고 있다. 일반적으로 릴레이 통신 시스템은 소스, 릴레이, 목적지로 구성된다. 릴레이 통신 시스템의 간단한 전송구조는 두 개의 시간 슬롯이 필요하다. 첫 번째 시간 슬롯에서는 소스가 변조된 신호를 릴레이와 목적지로 동시에 전송한다. 릴레이는 수신된 신호를 복조하고 재 변조해서 두 번째 시간 슬롯에 재 변조된 신호를 목적지로 전송한다. 릴레이 통신 시스템은 추가적인 시간 슬롯이 필요하지만, 소스-릴레이 링크와 릴레이-목적지 링크가 소스-목적지의 링크보다 높은 신호 대 잡음 전력비(signal to noise power ratio, SNR)를 제공하므로 직접 전송(point-to-point communication)하는 방법보다 뛰어난 성능을 나타낸다.

릴레이 통신 시스템을 실현하기 위해 다양한 전송 방법이 연구되고 있다. 그 중 대표적인 전송 방법은 릴레이가 하는 역할에 따라 AF(amplify-and-forward), DF(decode-and-forward), CC(coded cooperation)로 나누어진다. AF는 첫 번째 시간 슬롯에서 소스로부터 수신한 신호를 릴레이가 단순히 증폭만 하여 두 번째 시간 슬롯에 목적지로 전송하는 방법이다. DF는 릴레이가 수신신호를 재생하는 전송 구조이다. 릴레이는 소스로부터 수신한 신호를 복조와 복호 과정을 거쳐 데이터를 추정하고, 추정한 데이터를 재 부호화와 재 변조하여 두 번째 시간 슬롯동안 목적지로 전송한다[1]. CC는 채널코딩을 사용하는 전송 구조이다. 부호화된 비트는 두 개의 부분 N1과 N2로 나누어진다. 첫 번째 시간 슬롯에서 N1은 릴레이와 목적지로 동시에 전송이 되고,

릴레이는 N1을 복조와 복호화 한다. 두 번째 시간 슬롯에서는 릴레이가 복호화된 비트로부터 펀처링(puncturing)을 통해 N2만 추출하여 목적지로 전송한다[2]. 이 전송구조들은 릴레이에서 서로 다른 알고리즘을 사용하고 있지만 추가적인 시간 슬롯이 필요하다는 공통점이 있다.

무선 브로드캐스트(broadcast) 특성은 소스가 릴레이와 목적지에 동시에 신호를 전송할 수 있게 한다. 하지만 소스-릴레이 링크의 채널 SNR과 소스-목적지 링크의 채널 SNR은 다르다. 이로 인해 소스는 변조레벨을 릴레이와 목적지 중 어느 곳에 맞춰야하는지를 결정해야 한다. 이 문제를 해결하기 위해 계층변조가 사용된다[3]. 계층변조는 릴레이에서는 수신신호가 높은 변조레벨로 간주되고, 목적지에서는 낮은 변조레벨로 간주된다.

본 논문에서는 계층변조를 사용하는 릴레이 통신시스템의 비트 오류율(bit error rate, BER) 성능을 분석한다. 계층변조를 사용하는 시스템의 BER은 계층변조 파라미터의 값에 의해 달라진다. 우리는 BER과 계층변조 파라미터의 관계를 유도하고, 모의실험을 통해 최소 BER을 얻을 수 있는 최적의 계층변조 파라미터 값을 찾는다.

### 2. 시스템 모델

본 논문에서는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)의 부반송파에 계층변조를 적용한 릴레이 통신 시스템을 고려한다. 릴레이는 반이중방식(half duplex)으로 동작한다고 가정한다. 릴레이의 사용으로 인해 소스에서 목적지로 데이터를 전송하려면 두 개의 시간 슬롯이 필요하다. 첫 번째 시간 슬롯에서 소스는 릴레이와 목적지로 동시에 신호를 전송하며, 두 번째 시간 슬롯에서는 릴레이가 소스로부터 수신한 신호를 목적지로 전송한다. 그림1은 본 논문에서

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구결과임

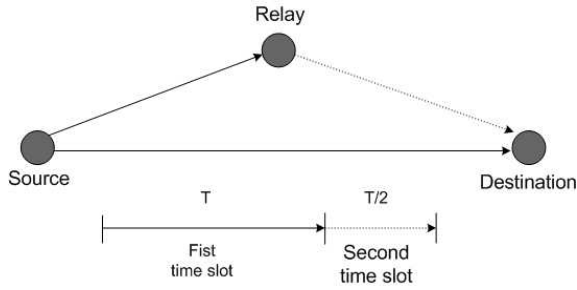


그림 1 릴레이 통신 시스템의 전송 구조

서 사용하는 릴레이 통신 시스템의 전송구조이다.

그림 2는 OFDM의 부반송파에 계층변조를 사용한 릴레이 통신 시스템의 블록도를 나타낸다. 그림 2에서  $\mathbf{d}$ 는 소스로부터 목적지로 전송되는 데이터 비트를 나타내며,  $\hat{\mathbf{d}}$ 는  $\mathbf{d}$ 의 추정된 비트를 나타낸다. 소스는 그레이 부호(Gray code)를 적용한 16-QAM(quadrature amplitude modulation) 계층변조를 사용하여 데이터 비트를 심볼로 매핑한다.

그림 3과 같이 계층적으로 변조된 심볼은 릴레이에서는 16-QAM 심볼로 간주되며, 목적지에서는 QPSK(quadrature phase-shift keying) 심볼로 간주된다. 신호점(signal constellation)에서 앞의 두 개 비트는 사분면의 위치를 결정하며, 뒤의 두 개 비트는 해당 사분면에서의 QPSK 심볼을 나타낸다.  $n$ 번째 OFDM 심볼의  $k$ 번째 부반송파에 전송되는 16-QAM 계층변조의 심볼은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$X(n, k) = X_{HP}(n, k) + X_{LP}(n, k) \quad (1)$$

여기서,  $X_{HP}(n, k)$ 는 HP(high priority) QPSK 심볼을 나타내며,  $X_{LP}(n, k)$ 는 LP(low priority) QPSK 심볼을 나타낸다.

계층변조는 비균등한 신호점을 사용한다. 비균등 비율을  $\alpha = (a/b)$ 로 표현하기로 한다. 그림 3과 같이  $a$ 는 인접 사분면의 심볼 사이의 최소거리를 나타내고,  $b$ 는 한 사분면에서 인접한 심볼 사이의 최소거리를 나타낸다.  $\alpha$ 가 커질수록 16-QAM의 신호점에 비해 계층변조의 비균등 비율은 증가한다. 만약 주어진 CNR(carrier to noise ratio)에서  $\alpha$ 가 커진다면 HP 비트의 BER은 감소하는 반면에 LP 비트의 BER은 증가한다[4][5].

릴레이는 소스로부터 수신한 신호  $y_{s,r}$ 를 복조한 후 LP 데이터만

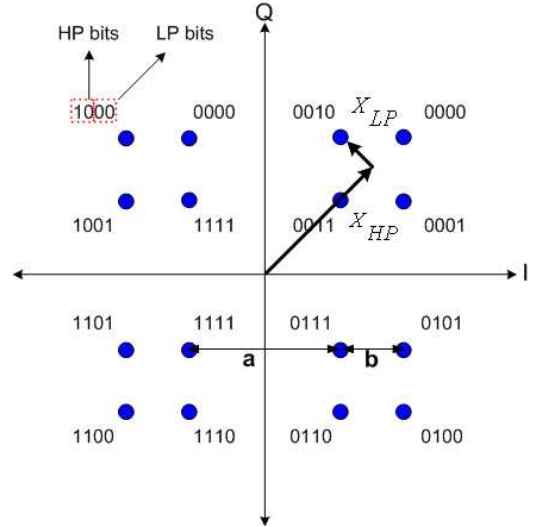


그림 3 16-QAM 계층변조의 신호점

추출한다. 추출된 LP 데이터는 16-QAM으로 변조된 후 OFDM 변조기를 통해서 첫 번째 시간슬롯 길이의 절반인 두 번째 시간슬롯에서 목적지로 전송된다.

목적지는 두 개의 시간 슬롯을 통해서 두 개의 신호를 수신한다. 그림 2와 같이  $y_{s,d}$ 는 첫 번째 시간 슬롯에서 소스로부터 수신된 신호이며,  $y_{r,d}$ 는 두 번째 시간슬롯에서 릴레이로부터 수신된 신호이다. 목적지는  $y_{s,d}$ 를 QPSK 변조된 OFDM 심볼로 간주하므로  $y_{s,d}$ 로부터 HP 비트만 추정한다. LP 비트는  $y_{r,d}$ 로부터 OFDM 복조와 16-QAM 디매핑 과정을 통하여 추정된다.

그림 2에서  $channel1$ ,  $channel2$ ,  $channel3$ 은 각각 소스와 목적지, 소스와 릴레이, 릴레이와 목적지 사이의 AWGN(additive white Gaussian noise) 채널을 나타낸다. 각 채널의 경로손실지수(path-loss exponent)는 2.7로 가정하며, 릴레이의 위치는 소스와 목적지 가운데에 있다고 가정한다. 이로부터 소스-릴레이 링크와 릴레이-목적지 링크의 채널 SNR을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} SNR_{sr} &= SNR_{rd} = SNR_{sd} + (10)(2.7)\log_{10}(2) \\ &= SNR_{sd} + 8.13 \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $SNR_{sd}$ 는 소스-목적지 링크의 채널 SNR을 나타낸다.

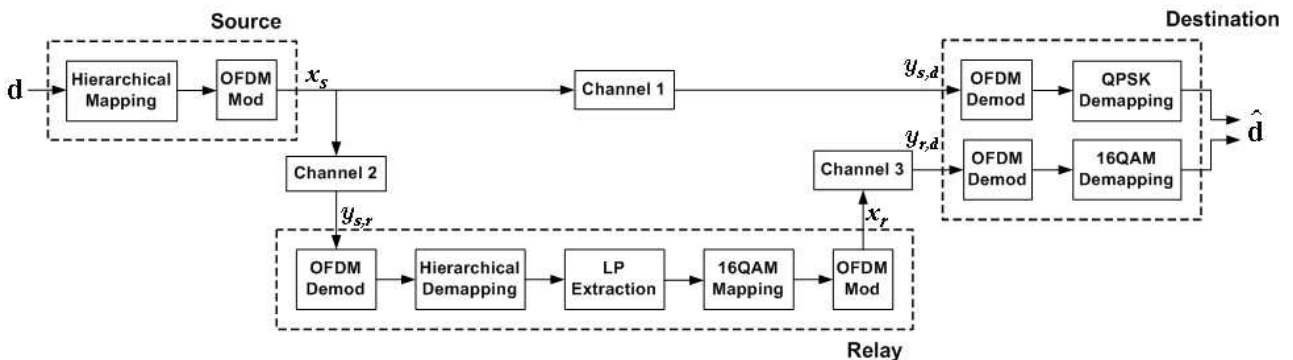


그림 2 계층변조를 적용한 릴레이 통신 시스템의 블록도

### 3. 시스템의 성능분석

앞 절에서 설명했듯이, 소스는 계층변조를 사용하여 릴레이와 목적지로 브로드캐스팅 한다. 본 절에서는 릴레이 통신 시스템에서 계층변조를 사용할 경우의 BER 성능을 분석하고, 모의실험을 통하여 최소 BER을 얻을 수 있는 최적의  $\alpha$ 를 찾아낸다.

#### 가. 릴레이 통신 시스템의 BER

계층변조를 사용하지만, 릴레이를 사용하지 않고 직접 전송하는 시스템에서의 BER은 많은 논문에서 연구되었다. AWGN채널에서 16-QAM 계층변조의 BER은 [6]과[7]에 명시되어 있다. 본 절에서는 이를 바탕으로 릴레이 통신 시스템에서의 BER을 유도한다. 계층변조는 첫 번째 시간 슬롯동안 소스가 신호를 목적지와 릴레이로 동시에 전송할 경우에 사용된다. 다소 복잡한 과정을 거쳐 계층변조의 HP 비트와 LP 비트의 BER을 아래와 같이 SNR과  $\alpha$ 에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{b,HP}(\alpha) = \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{SNR}{2\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha^2}\right)}}\right) \quad (3)$$

$$P_{b,LP}(\alpha) = \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{SNR}{\alpha^2 + 2\alpha + 2}}\right) \quad (4)$$

여기서,  $Q(\cdot)$ 는 Q-함수를 의미한다. 이로부터 제안한 릴레이 통신 시스템의 BER은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_b(\alpha) = \frac{1}{2} [P_{b,srd}(\alpha) + P_{b,sd}(\alpha)] \quad (5)$$

여기서,  $P_{b,srd}(\alpha)$ 는 소스에서 릴레이를 통하여 목적지로 전송되는 LP 데이터의 BER을 나타내며,  $P_{b,sd}(\alpha)$ 는 소스에서 목적지로 직접 전송되는 HP 데이터의 BER을 나타낸다.  $P_{b,sd}(\alpha)$ 는  $P_{b,HP}(\alpha)$ 와 같으며,  $P_{b,srd}(\alpha)$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{b,srd}(\alpha) = P_{b,sr}(\alpha)[1 - P_{b,rd}(\alpha)] + [1 - P_{b,sr}(\alpha)]P_{b,rd}(\alpha) \quad (6)$$

여기서,  $P_{b,rd}(\alpha)$ 는 릴레이로부터 목적지로 전송되는 LP 데이터의 BER을 나타낸다.  $P_{b,sr}(\alpha)$ 은 소스로부터 릴레이로 전송되는 LP 데이터의 BER을 나타내며, 아래와 같이 주어진다.

$$P_{b,sr}(\alpha) = Q\left(\sqrt{\frac{SNR_{sr}}{\alpha^2 + 2\alpha + 2}}\right) \quad (7)$$

여기서,  $SNR_{sr}$ 은 소스-릴레이 링크의 채널 SNR을 나타낸다. 릴레이는 일반적인 16-QAM을 사용하여 목적지로 신호를 전송한다. 그러므로  $P_{b,rd}(\alpha)$ 는 아래와 같이 주어진다[8].

$$P_{b,rd}(\alpha) = P_{b,16QAM}(\alpha) \simeq \frac{3}{4} Q\left(\sqrt{\frac{SNR_{rd}}{5}}\right) \quad (8)$$

(6),(7),(8)로부터 릴레이 통신 시스템의 BER을 나타내는 (5)는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_b(\alpha) = \frac{1}{2} \left[ Q\left(\sqrt{\frac{SNR_{sr}}{\alpha^2 + 2\alpha + 2}}\right) + \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{SNR_{rd}}{2\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha^2}\right)}}\right) \right] \quad (9)$$

(9)로부터  $P_b(\alpha)$ 는 계층변조 파라미터  $\alpha$ 에 의존한다는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 릴레이 통신 시스템에서 최소 BER을 얻을 수 있는 최적의  $\alpha$  값을 찾을 수 있다. 하지만 식으로부터 직접 구하는 방법은 매우 어려우므로 다음 절에서 모의실험을 통해 최적의  $\alpha$  값을 구하고자 한다.

#### 나. 모의실험 결과

그림 4에서는 앞 절에서 유도한 성능 분석방법을 증명하기 위해 모의실험 결과와 유도한 결과를 비교한다. 그림 4는  $\alpha=3$ 일 경우 각 링크와 목적지에서의 BER 성능을 나타내고 있다. 점선은 (9)의 이론적인 결과를 나타내며, 실선은 모의실험 결과를 나타낸다. 그림 4를 살펴보면 이론적인 결과와 모의실험의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 5는 릴레이 통신 시스템에서  $\alpha$  값을 다르게 사용했을 때의 BER 성능을 나타낸다.  $\alpha=1$ 인 경우는 일반적인 16-QAM에 해당한다.  $\alpha$ 가 1, 2, 5, 6인 경우 중,  $\alpha=2$ 인 경우가 다른  $\alpha$  값의 BER 성능보다 좋은 성능을 나타내고 있다. 그림 5의 결과로부터  $\alpha$ 에 따라 릴레이 통신 시스템의 성능이 달라진다는 것을 알 수 있다. 그러므로 릴레이 통신 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 최소 BER을 나타내는  $\alpha$  값을 구할 필요가 있다.

그림 6은 소스-목적지 링크의 채널 SNR이 14dB인 경우  $\alpha$ 에 따른 BER 곡선을 나타낸다. 전체 BER은 HP 비트의 BER과 LP 비트의 BER의 합의 형태로 나타낸다. 그림 6을 통해 전체 BER은 낮은 SNR 구간에서는 HP 비트의 BER에 의존하고, 높은 SNR 구간에서는 LP 비트의 BER에 의존한다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 다른 SNR에서  $\alpha$ 에 대한 릴레이 통신 시스템의 BER 성능을 나타내고 있다. 소스-목적지 링크의 채널 SNR이 10dB에서 15dB로 증가함에 따라 최소 BER을 나타내는  $\alpha$  값이 2.0에서 2.5로 달라진다. 이것은 높은 SNR 구간에서 LP 비트의 BER이 HP 비트의 BER보다 빠르게 감소하기 때문에 최적의  $\alpha$  값이 SNR에 따라 달라진다는 것을 의미한다.

### 4. 결론

본 논문에서는 계층변조를 적용하는 릴레이 통신 시스템에서의 BER을 유도하였다. 모의실험 결과를 통하여 BER은 계층변조의 비등분 비율을 나타내는  $\alpha$  값에 의존한다는 것을 확인 할 수 있었으며, 릴레이 통신 시스템에서 최소 BER을 나타내는 최적의  $\alpha$  값을 찾을 수 있었다. 모의실험 결과는 소스-릴레이 링크의 채널 SNR과 릴레이-목적지 링크의 채널 SNR이 다른 릴레이 통신 시스템에서 처리량(throughput)을 향상시킬 수 있다.

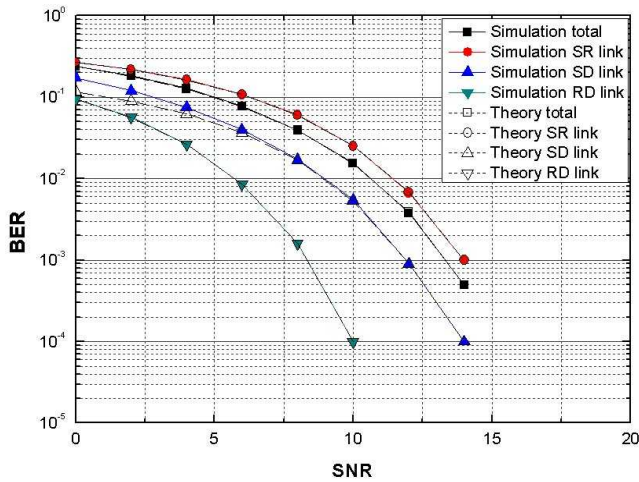


그림 4  $\alpha=3$ 인 경우 SNR에 따른 BER 성능

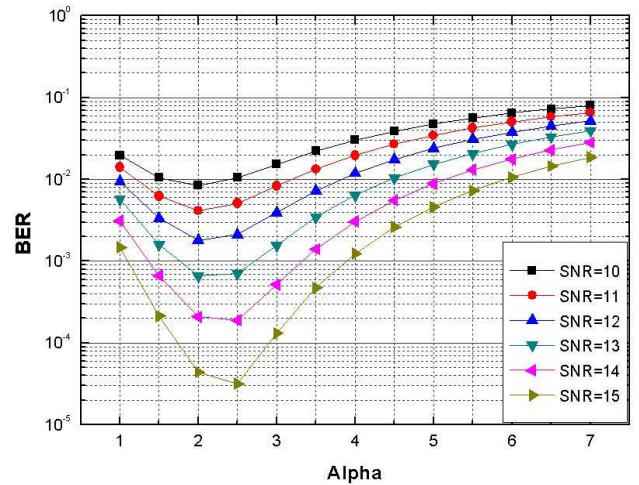


그림 7  $SNR_{sd}$ 이 다른 경우  $\alpha$ 에 따른 BER 성능 비교

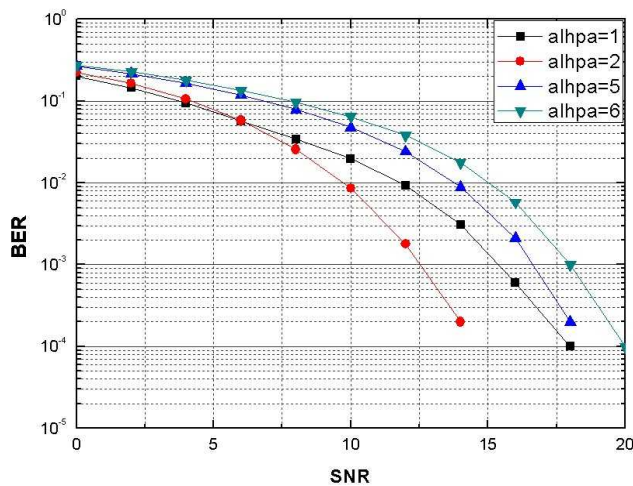


그림 5  $\alpha$  값이 다른 경우 SNR에 따른 BER 성능 비교

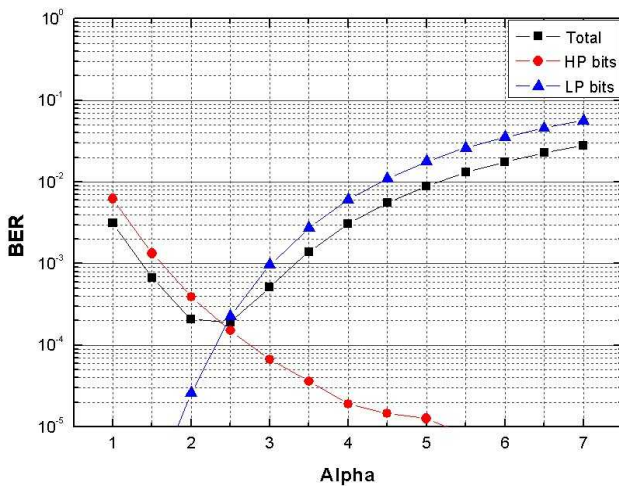


그림 6  $SNR_{sd}=14\text{dB}$  인 경우  $\alpha$ 에 따른 BER 성능

## 참고문헌

- [1] J. Nicholas Laneman, David N. C Tse and Gregory W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior," submitted to IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [2] Todd E. Hunter and Aria Nosratinia, "Diversity through Coded Cooperation," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 5, no. 2, pp. 283-289, Feb. 2006.
- [3] Christoph Hausl and Joachim Hagenauer, "Relay Communication with Hierarchical Modulation," IEEE Commun. Letters, vol. 11, no. 1, pp. 64-66, Jan. 2007.
- [4] Hong Jiang and Paul A. Wilford, "A Hierarchical Modulation for Upgrading Digital Broadcast Systems," IEEE Trans. Broadcasting, vol. 51, No. 2, pp. 223-229, June 2005.
- [5] Sung-Hoon Kim, Yang-Su Kim, Jong-Soo Lim, Chieteuk Ahn, Un-Rak Choi, and Bo-Seok Seo, "Design of the Channel Estimation Algorithm for Advanced Terrestrial DMB System," IEEE Trans. Broadcasting, vol. 54, no. 4, pp. 816-820, Dec. 2008.
- [6] Pavan. K. Vitthaladevuni and Mohamed Slim Alouini, "A Recursive Algorithm for the Exact BER Computation of Generalized Hierarchical QAM Constellations," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 49, no. 1, pp. 297-307, Jan. 2003.
- [7] 최운락, 서보석, "계층변조 시스템에서 신호의 우선순위를 이용한 블라인드 등화," 한국콘텐츠학회논문지, 제7권, 제 12호, pp. 254-261, 2007년 12월.
- [8] John G. Proakis, *Digital communications*, Mc Graw Hill, Fourth Ed. 2001.