

# 부분대역간섭이 존재하는 하이브리드 SC/MRC-Lc/L 다이버시티 수신 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 해석

김영철<sup>\*</sup> · 노재성<sup>\*\*</sup> · 임길용<sup>\*</sup> · 조성준<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>인하공업전문대학 정보통신과 · <sup>\*\*</sup>서일대학 정보통신과 · <sup>\*\*\*</sup>한국항공대학교  
전자·정보통신·컴퓨터공학부

## Performance Analysis of Multi-Carrier DS-CDMA System using Hybrid SC/MRC-Lc/L Diversity Received in the presence of PBI

Young-Chul Kim<sup>\*</sup> · Jae-Sung Roh<sup>\*\*</sup> · Kill-Yong Leem<sup>\*</sup> · Sung-Joon Cho<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Dept. of Inform. & Comm. Eng., Inha Technical College · <sup>\*\*</sup>Dept. of Inform. & Comm. Eng., Seoil College · <sup>\*\*\*</sup>School of Electronics, Telecom. & Computer Eng., Hankuk Aviation Univ.

E-mail : yckim@mail.hangkong.ac.kr

### 요 약

본 논문에서는 부분대역간섭 (PBI : Partial Band Interference)이 존재하는 다중경로 페이딩 환경에서 하이브리드 SC/MRC-Lc/L 다이버시티 수신 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능을 알아보고, 광대역 DS-CDMA 시스템과 비교 분석하였다. 결과적으로 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서 부분대역간섭에 대한 영향은 성능 열화정도가 전체 주파수 대역 중 일부대역에서 만 받기 때문에 광대역 DS-CDMA 시스템보다는 심각하지 않았다. 또한, 하이브리드 SC/MRC-Lc/L 다이버시티 수신 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템은 입력 다이버시티 가지의 수를 적절히 선택함으로써 시스템의 복잡성과 성능 대 비용을 결정할 수 있다.

### 키워드

Multi-Carrier DS-CDMA, Hybrid SC/MRC-Lc/L Diversity, PBI, Rayleigh fading

### 1. 서 론

최근의 개인 이동통신은 다양한 서비스와 함께 다양한 시스템이 구축되어 활용되고 있으며, 많은 무선 자원을 활용하고 있다. 예로서 이동통신은 제 2.5 세대를 지나 제 3 세대, 그리고 음성과 무선 데이터 서비스 및 영상 등의 방송이 혼합된 제 4 세대를 준비하고 있다. 뿐만 아니라 실내·외를 구분하지 않는 고속의 무선 LAN(Local Area Network)과 양방향의 DAB (Digital Audio Broadcasting)와 같은 고용량의 서비스를 준비 중에 있다[1],[2].

본 논문에서는 이미 상용화된 직접확산 CDMA (DS-CDMA : Direct Sequence-Code Division Multiple Access) 방식을 보완한 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템을 이용한다. 기존의 직접확산 신호는 대역폭이 넓으므로 채널의 동기(coherent) 대역폭을 초과하게 되어, 주파수 선택성 페이딩의 영향을 받게 되는 단점이 있다. 그러므로 다중경로 페이딩과 주파수 선택성 페이딩의 영향을 받지 않도

록 동기 대역폭 ( $\Delta f$ )보다 큰 칩 구간 ( $T_c$ )을 갖는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템을 이용한다[3]-[5].

본 논문에서는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템과 이의 구조를 더욱 간략화 한 하이브리드 (Hybrid) SC/MRC-Lc/L 수신기를 이용한다. 시스템의 장점으로는 다중경로 페이딩에 강인성과 협대역 간섭 억제 효과를 가지게 되며, 낮은 칩율의 DS-CDMA 시스템과 구성의 단순화로 인한 비용 절감이 가능하다. 또한, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템과 광대역 DS-CDMA 시스템은 전체 대역폭에 대하여 동일한 대역폭을 갖게 된다면, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 전체 대역폭은 반송파의 수( $M$ )에 의하여  $M$  개의 동일한 주파수 대역으로 나누어지고, 이는 광대역 DS-CDMA 시스템의 칩 구간 ( $T_c$ )보다  $M$  배가 커진 칩 구간 ( $MT_c$ )으로 확산 열이 변조되는 특징이 있다[4][5].

본 논문에서는 다중경로 페이딩 환경 하에서 부분대역간섭(PBI : Partial Band Interference)과 다중접속간섭(MAI : Multiple Access Interference)이 존재하는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능과 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  다이버시티 수신을 채용한 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능을 비교, 분석한다.

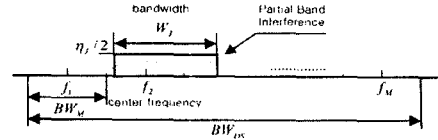


그림 1. 부분대역간섭 (PBI)의 전력 스펙트럼

## II. 채널 모델

### 2.1 무선 채널 모델

무선 채널은 다중 경로를 통하여 지연 확산이  $T_m$ 인 느린 레일리 페이딩 채널로 가정한다. 채널 모델 특성은 두 가지로 나눌 수 있는데 먼저, 시간 영역의 채널 모델로 RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템에서 다중 경로의 수 ( $L$ )은 다음과 같다.

$$L = \left\lfloor \frac{T_m}{T_c} \right\rfloor + 1 \quad (1)$$

여기서,  $T_m$ 과  $T_c$ 은 각각 지연 확산 시간과 광대역 시스템의 칩 주기이다. 그리고 무선 채널의 복소 저역 통과 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$c(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \zeta_l \delta(t - lT_c) \quad (2)$$

여기서,  $\zeta_l$ 은 평균이 "0"인 복소 가우스 랜덤 변수이다. 또한, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서 주파수 영역의 채널 모델은 동기(coherent) 대역폭 ( $\Delta f_c$ )에 의하여 특성 지워지며 다음과 같다.

$$(\Delta f_c) \approx \frac{1}{T_m} \quad (3)$$

위의 조건을 이용하여 다중 반송파의 수( $M$ )를 선택하기 위하여 가정한다면 각 반송파의 부 대역은  $T_m/(MT_c) \leq 1$ 이기 때문에 주파수 선택성이 아니다. 또한, 모든 부 대역은  $BW_M \geq (\Delta f_c)$ 으로 독립적인 페이딩을 받는다. 위의 두 조건을 만족하는 반송파의 수( $M$ )의 범위는 다음과 같다.

$$\frac{T_m}{T_c} \leq M \leq (1+a) \frac{T_m}{T_c} \quad (4)$$

식 (4)에서 왼쪽 부등식이 만족하면,  $M=L$ 을 선택하고, 오른쪽 부등식이 만족하면  $a \geq T_c/T_m$ 을 선택한다. 여기서  $(\Delta f_c) = 1/T_m$ 이다[4]. 또한 부분대역간섭 (PBI)은 광대역 CDMA 시스템의 대역폭 ( $BW_{DS}$ )과 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 대역폭 ( $BW_M$ )을 통하여 비교한다. 그림 1은 부분대역간섭의 전력 스펙트럼이다[4]-[6].

### 2.2 레일리 페이딩 환경에서 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$ 수신기의 출력

본 논문에서는 무선채널 환경을 레일리 페이딩 환경이라 가정하며, 수신 신호 중에는 반사파 성분만이 존재한다.

하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  수신기의 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템에서  $M$ 개의 반송파는 각각  $L$ 개의 입력 가지로 수신된다고 가정하며, 이 중에 최대치의 신호대 잡음 전력비 (SNR)을 갖는  $L_c$ 개의 가지를 선택하도록 고려된다. 각 가지들의 신호대 잡음 전력비는 독립적인 랜덤 변수로서 모델링 되어진다. 선택 합성 Logic의 입력치에 할당된 페이딩 진폭은 큰 진폭에서 작은 진폭인  $a_1, a_2, \dots, a_L$ 의 순서로 나열되며 각각에 대한 평균 신호 전력 ( $\Omega$ )을 갖는다. 각 채널에 대한 비트 당 순시 신호대 잡음 전력비는 다음과 같이 정의한다면,  $\gamma_l = a_l^2 E_b / \eta_0$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$  ( $E_b / \eta_0$ 는 비트 에너지대 잡음 전력비)이다. 각 채널에 부합되는 비트당 평균 신호대 잡음 전력비는  $\bar{\gamma}_l = \overline{a_l^2 E_b / \eta_0} = \Omega E_b / \eta_0$ 이다. 순시 신호대 잡음 전력비 ( $\gamma_l$ )의 최대치 가지 ( $L_c$ )의 결합 확률밀도함수는 다음과 같다[3].

$$p_{\gamma_1, \dots, \gamma_{L_c}}(\gamma_1, \dots, \gamma_{L_c}) = L_c! \binom{L}{L_c} [P_\gamma(\gamma_{L_c})]^{L-L_c} \prod_{l=1}^{L_c} p_\gamma(\gamma_l) \quad (5)$$

$$\gamma_1 \geq \dots \geq \gamma_{L_c} \geq 0$$

$$\text{단, } \binom{L}{L_c} = \frac{L!}{L_c!(L-L_c)!}$$

여기서,  $p_\gamma(\gamma)$ 는  $\gamma$ 의 확률밀도함수이고

$P_\gamma(\gamma) = \int_0^\gamma p_\gamma(y) dy$ 는 조건부 분포함수이다. 이와 같이  $\gamma_1, \dots, \gamma_{L_c}$ 은 식 (5)로부터 독립적이지 않다. 무선채널에서 각 가지에 대하여 레일리 페이딩의 확률밀도함수  $p_\gamma(\gamma_l)$ 는 다음과 같다.

$$p_\gamma(\gamma_l) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma_l}{\gamma}\right) \quad (6)$$

그리고,  $P_\gamma(\gamma_l) = \int_0^{\gamma_l} p_\gamma(y) dy = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_l}{\gamma}\right)$ 는 조건부 분포함수이다.

### III. Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 해석

본 논문은 다중경로 채널을 가정하고, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의  $k$ 번째 사용자에 대한  $i$ 번째 주파수 대역의 전달 함수는  $\zeta_{k,i} \equiv a_{k,i} \exp(j\beta_{k,i})$ 으로 주어지며,  $a_{k,i}$ 와  $\beta_{k,i}$ 는 각각 2차 평균 레일리 랜덤 변수인 진폭과  $[0, 2\pi)$ 인 단위 랜덤 변수의 위상이다. AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널에서 수신된 Multi-Carrier DS-CDMA의 수신된 신호는 다음과 같이 주어진다[4],[5].

$$r(t) = \sum_{k=1}^U \left\{ \sqrt{2E_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^{(k)} c_n^{(k)} h(t - nMT_c - \tau_k) + \sum_{m=1}^M a_{k,m} \cos(\omega_m t + \theta_{k,m}) \right\} + n_w(t) + n_f(t) \quad (7)$$

여기서,  $h = \lfloor n/N \rfloor$ 는 칩 파형 형성 필터의 임펄스 응답이다. 위상은  $\theta_{k,m} = \theta_{k,m} + \beta_{k,m}$ 이고,  $n_w(t)$ 는 양측파대의 전력이  $\eta_0/2$ 인 AWGN이다.  $n_f(t)$ 는 부분대역간섭 전력이며,  $U$ 는 사용자 수이고  $M$ 는 반송파의 수이다.

임의의 사용자에게 대하여 반송파 동기 및 비트 동기가 이상적으로 이루어졌다고 가정하면,  $i$ 번째 칩 정합 필터기의 출력  $y_i(t)$ 는 다음과 같다.

$$y_i(t) = S_{y_i}(t) + I_{y_i}(t) + J_{y_i}(t) + N_{y_i}(t) \quad (8)$$

$$\text{단, } S_{y_i}(t) = \sqrt{E_c} a_{1,i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^{(1)} c_n^{(1)} x(t - nMT_c) \quad (9)$$

$$I_{y_i}(t) = \sum_{k=2}^U \left\{ \sqrt{E_c} \zeta_{k,i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n^{(k)} c_n^{(k)} x(t - nMT_c - \tau_k) \right\} \quad (10)$$

$$J_{y_i}(t) = L p \{ n_{y_i}^{(i)}(t) \sqrt{2} \cos(\omega_i t + \theta_{1,i}) \} \quad (11)$$

$$N_{y_i}(t) = L p \{ n_{w,i}^{(i)}(t) \sqrt{2} \cos(\omega_i t + \theta_{1,i}) \} \quad (12)$$

여기서,  $\zeta_{k,i} \equiv a_{k,i} \cos \phi_{k,i}$ 와  $\phi_{k,i} = \theta_{k,i} - \theta_{1,i}$ 는 가우스 분포를 하게되며,  $I_{y_i}(t)$ 는 다른 사용자로부터의 간섭과  $J_{y_i}(t)$ 는 부분대역간섭을 나타낸다.  $N_{y_i}(t)$ 는 필터링 된 가우스 잡음이고,  $n_w^{(i)}(t)$ 는  $n_w(t)$ 가  $i$ 번째 대역통과 필터를 거친 신호이다.  $L p(\cdot)$ 는 저역통과 필터를 나타낸다. 또한 여러 명의 사용자를 고려하여  $c_n^{(1)}$ 이  $M$  열이면, 모든 상관기의 신호 출력 ( $Z$ )은 다음과 같다[5].

$$Z = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^{L_c} g_{l,i} Z_i \quad (13)$$

여기서,  $g_{l,i}$ 는  $L_c$ 의 다이버시티 이득을 갖는  $i$ 번째 경로에서의 이득이며,  $Z$ 가 최대가 된다. 이때 일반적인 수신기 구조에서는  $M$ 개의 열을 얻게 되지만, 하이브리드 SC/MRC 수신기에서는 SC Logic에 의하여  $L$ 개의 가지 중에  $L_c$ 개가 선택된다. 다음으로  $g_{l,i}$ 는 다음과 같다.

$$g_{l,i} = \frac{E\{Z_i | \alpha_{1,i}\}}{\text{Var}\{Z_i | \alpha_{1,i}\}} \quad (14)$$

여기서,  $Z_i$ 의 조건부 평균과 분산이 추정 가능하다면, Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 조건

부 신호대 잡음 전력비 ( $= \rho_m$ )는 다음과 같다.

$$\rho_m = \frac{E^2\{Z | \alpha_1\}}{\text{Var}\{Z | \alpha_1\}} \equiv N^2 E_c \gamma \quad (15)$$

식 (15)를 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\rho_m = N^2 E_c \sum_{i=1}^M \frac{a_{1,i}^2}{\frac{(U-1)NE_c}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{N\eta_0}{2}} \quad (16)$$

$$= \left\{ \frac{U-1}{2MN} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{\eta_0}{2MNE_c} \right\}^{-1} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M a_{1,i}^2$$

식 (16)에서  $M=1$ ,  $L=1$ 인 경우, 단일 반송파 광대역 DS-CDMA 시스템의 조건부 신호대 잡음 전력비가 되며, 이때는  $(1/M) \sum_{i=1}^M a_{1,i}^2$ 과  $\sum_{i=1}^M a_{1,i}^2$ 가 동일한 확률밀도함수가 되어, 비트 에너지 스펙트럼 밀도  $E_b$ 는  $M=L$ 이므로  $MN=N$ ,  $MNE_c = N E_c = E_b$ 가 된다. 따라서, RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템과 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 차이는 없게 된다.

최종적으로 다중경로 레일리 페이딩과 다중접속 사용자 간섭 채널에서 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  수신기의 Multi-Carrier DS-CDMA BPSK (Binary Phase Shift Keying) 신호의 비트 오류율은 다음과 같이 구할 수 있다[5].

$$Pe = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \text{Erfc}(\sqrt{\gamma}) \cdot p_{n_r, r_s}(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma \quad (17)$$

단,  $\text{Erfc}(\cdot)$ 는 오류 보함수이다.

### IV. 부분대역간섭이 존재하는 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 해석

다음으로 부분대역간섭(PBI : Partial Band Interference)은 대역 제한 된 가우스 잡음과 같다고 가정한다. 주파수 대역은 인접한 주파수 슬롯이 정수 배로 겹쳐서 간섭을 발생한다. 이에 대한, 부분대역간섭(PBI)의 전력 스펙트럼 밀도  $S_{n_i}(f)$  (p.s.d : power spectrum density)는 다음과 같다[4].

$$S_{n_i}(f) = \begin{cases} \frac{n_i}{2}, & f_p - \frac{W_i}{2} \leq |f| \leq f_q + \frac{W_i}{2} \\ 0, & \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (18)$$

여기서,  $f_p$ 와  $f_q$ 는 각각  $p$  번째와  $q$  번째의 반송파 주파수이고  $W_j = W(1+a)$ 는 부분대역간섭 (PBI)의 대역폭이다.  $f_p \leq f_q$  그리고  $n_i$ 는 간섭의 한 측파대의 전력 스펙트럼 밀도이다. 따라서 간섭 전력 대 신호 전력비 (JSR: Joint interference power-to-Signal power Ratio)은 다음과 같다.

$$\text{JSR} = \frac{\text{interference power}}{\text{signal power}} = \frac{n_i W_i}{E_b T} \quad (19)$$

이를 이용하여, 식 (16)으로부터 유도과정을 얻을 수 있으며, 부분대역간섭(PBI)가 존재하는

Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 조건부 신호 전력 대 잡음비 ( $\rho_{mPBI}$ )는 다음과 같다.

$$\rho_{mPBI} = \left\{ \frac{U-1}{2MN} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{\gamma_0}{2MNE_c} + \frac{JSR}{2N} \right\}^{-1} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \alpha_{i,l}^2 \quad (20)$$

또한 식 (20)에서  $M = 1$ ,  $L = 1$ 인 경우, 광대역 DS-CDMA 시스템의 조건부 신호 전력 대 잡음 전력비 ( $\rho_{sPBI}$ )는 다음과 같다.

$$\rho_{sPBI} = \left\{ \frac{U-1}{2N} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{\gamma_0}{2N_1 E_{c1}} + \frac{JSR}{2N_1} \right\}^{-1} \sum_{i=1}^L \alpha_{i,l}^2 \quad (21)$$

따라서, 최종 오율식은 식 (17)을 이용하여 얻을 수 있다.

### V. 수치해석 및 결과

본 논문에서는 부분대역간섭이 존재하는 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  다이버시티 수신 시 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 오율 성능을 사용자 수 ( $U$ ), 반송파의 수 ( $M$ )와 다중경로의 수 ( $L$ )에 따라 분석하였다.

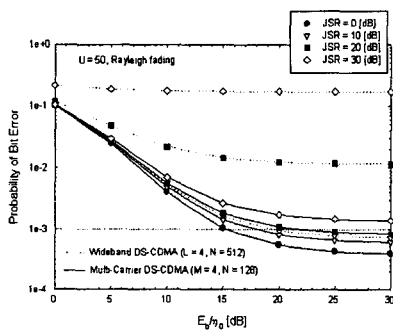


그림 2 부분대역간섭 (PBI)이 존재하는 레일리 페이딩 채널에서 광대역 DS-CDMA 시스템과 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 오율 성능 비교

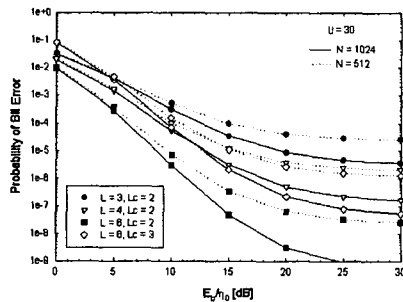


그림 3 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템의 오율 성능

그림 2는 반사파 만이 존재하는 열악한 환경인 레일리(Rayleigh) 페이딩 채널에서 사용자 수 ( $U$ )가 50 명에 대하여 부분대역간섭(PBI)에 따른 변

화를 보였다. 여기서, 광대역 DS-CDMA 시스템은 RAKE 수신기의 가지 ( $L$ )가 4 개인 경우로서, 부분대역간섭 (PBI)은 주파수 선택성 페이딩이나 강한 재밍으로 성능 감쇄가 심각함을 알 수 있다. 그러나 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템은 성능 열화정도가 부분적인 대역만을 받기 때문에 광대역 DS-CDMA 시스템보다는 열화정도가 심각하지 않음을 알 수 있다. 결과적으로 부분대역간섭 (PBI)은 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템인 경우에 협대역 간섭으로 영향을 미치지만, 광대역 DS-CDMA 시스템은 주파수 선택성 페이딩이나 재밍 (jammng)으로 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

그림 3은 하이브리드 SC/MRC- $L_c/L$  RAKE 수신기를 채용한 광대역 DS-CDMA 시스템의 오율 성능으로서 다양한 가지 수를 채용한 경우이다. 여기서 사용자 수 ( $U$ )는 30 명이고, 처리이득 ( $M$ )은 1024 와 512인 경우이다. 그림에서 광대역 DS-CDMA 시스템은 처리이득 ( $M$ )이 커짐으로서 RAKE 수신기의 가지 이득과 시너지 효과가 있음을 알 수 있다. 그리고 RAKE 수신기의 입력되는 가지  $L = 3$ 개, 4개 그리고 6개는 동일한  $L_c = 2$ 개인 경우에 가지의 수가 많을수록 성능 개선이 큼을 알 수 있다. 이는 입력 가지가 많을 수록 선택의 폭이 커짐으로 성능 개선을 이룰 수 있음의 의미한다. 위의 결과 그림에서, 가지의 배수가 동일한 경우에는 가지의 수가 적은  $L = 4$ ,  $L_c = 2$ 개가 시스템의 복잡성과 경제적인 면에서 더욱 효율적임을 알 수 있다.

### 참고문헌

- [1] Harri Holma, WCDMA for UMTS. WILEY, 2000.
- [2] Vijay K. Garg, IS-95 CDMA and CDMA2000. Prentice Hall PTR, 2000.
- [3] T. Eng, N. Kong, and L. B. Milstein, "Comparison of diversity combining techniques for Rayleigh-fading channel," IEEE Trans. Commun., vol. 44, pp. 1117-1129, Sept. 1996.
- [4] S. Kondo and L. B. Milstein, "Performance of multicarrier DS CDMA systems," IEEE Trans. Commun., vol. 44, no. 2, pp. 238-246, Feb. 1996.
- [5] 김영철, 다중경로 페이딩 환경에서 Multi-Carrier DS-CDMA 시스템의 성능 해석, 한국항공대학교 대학원, 항공통신정보공학과, 박사학위논문, 2002년 2월
- [6] M. K. Simon and M. Alouini, Digital Communication over Fading Channels. John Wiley & Sons, Inc., 2000.