

# 다중 경로 페이딩 채널에서의 STTC CDMA 시스템의 최적, 준최적 복호 방식과 성능 연구

정희원 기영민\*, 임은정\*, 정보훈\*, 김동구\*

## Optimum and Sub-optimum Decoding Methods of Space-Time Trellis Coded Code Division Multiple Access Systems in Multipath Fading Channels

Young Min Ki\*, Eun Jeong Yim\*, Bo Hun Chung\*, Dong Ku Kim\* *Regular Members*

### 요 약

다중 경로 페이딩 채널에서의 시공간 트렐리스 부호 (STTC, Space-Time Trellis Codes)의 성능 열화를 보완하기 위한 시공간 등화기는 수신기를 복잡하게 하는 단점이 있다. 본 논문은 시공간 트렐리스 부호화 CDMA 시스템 (STTC CDMA)과 다중 경로 페이딩 채널에서의 최적, 준최적 복호 방식을 제안하였다. 이 시스템은 다중 경로를 거쳐 수신된 신호를 PRC (Principal Ratio Combining) 기법을 사용하여 컴바이닝 하여 수신 SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)을 개선한 후, 복호하는 방식을 사용하고 있다. 컴바이닝과 복호 방식에 따라, 모든 신호들을 ML 복호하는 최적의 복호 방식, 각각의 수신 안테나 별로 다중 경로 신호를 단순히 합하여 복호하는 방식, 각각의 수신 안테나 별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 복호하는 방식, 그리고, 모든 수신 신호들을 PRC한 후 복호하는 방식이 있으며, 이 방식들은 복잡도에 비례하여 좋은 성능을 보인다. 특별히, 안테나 별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 ML 복호하는 방식은 최적의 ML 복호 방식에 비하여 낮은 복잡도로 유사한 성능을 얻을 수 있었다.

### ABSTRACT

The space-time equalizer has been used to enhance the space time code in the multipath fading channel. However it requires higher receive complexity. We present the space-time trellis coded code division multiple access system (STTC CDMA) and propose the optimum and sub-optimum decoding methods of this system in multipath fading channels. In the receiver, the principal ratio combining (PRC) maximizes the received signal to interference and noise ratio (SINR) by mutipath combining and reduces the complexity of the system. Then, combined signals are decoded by maximum likelihood (ML) decoding. According to the combining and decoding methods, there are four decoding methods. There are optimum ML decoding without combining, adding multipath signals in each receive antenna before decoding, combining multipath signals in each antenna before decoding, and combining all received signals before decoding. The receive performance of these methods is proportional to complexity. Also, the combining multipath signals in each antenna before decoding can achieve the performance comparable to that of the optimum ML decoding without combining, while reducing the complexity of the receiver.

\* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신 연구실(mellow@yonsei.ac.kr)  
논문번호 : 020128-0319, 접수일자 : 2002년 3월 19일

## I. 서론

이동통신 시스템의 용량은 대역폭, 채널간의 간섭, 전송 손실, 다중 경로 페이딩 등과 같은 물리적인 특성에 의하여 제약을 받는다. 그러나 이러한 제약 조건에도 불구하고, 차세대 멀티미디어 이동통신 서비스는 높은 데이터 전송률을 갖는 이동통신 시스템을 필요로 한다. 높은 데이터 전송률의 시스템을 구현하기 위한 방법으로서, 송수신단에 다중 안테나를 적용하는 기술이 국내외적으로 연구되어지고 있으며, 이를 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 시스템이라 부른다. 시공간 트렐리스 부호(STTC, Space-Time Trellis Codes)는 TCM (Trellis Coded Modulation)과 전송 디버시티 기술이 결합되어 설계된 MIMO 기술로서 V. Tarokh 등에 의하여 제안되었다<sup>[1]</sup>. 이들은 페이딩 채널에서의 STTC의 설계 조건을 제시하였으며, 이 설계 조건은 이후에 제시된 STTC 시스템들에서 가장 중요한 설계 조건으로서 사용되었다<sup>[1]</sup>. [2]에서 Y. Gong 등은 STTC의 성능이 다중 경로 페이딩 채널의 시간 지연 확산에 의하여 감쇄됨을 보이고, 등화기와 같은 ISI를 제거하는 구조가 필요하다는 것을 설명하였다. 그러나 일반적으로 시공간 등화기는 시스템의 복잡도를 증가시키는 문제점을 가지고 있다.

MIMO CDMA 기술은 크게 빔형성(Beamforming) 기술과 디버시티 기술로 나누어진다<sup>[6]</sup>. 본 논문에서는 다중 경로 페이딩 채널에서의 시공간 부호화 MIMO CDMA 시스템(STTC CDMA)을 제안하였다. 다중 경로 페이딩 채널에서 STTC CDMA 시스템은 RAKE 수신기를 이용한 다중 경로의 검출과 PRC (Principal Ratio Combining) 컴바이닝 기법<sup>[3]</sup>을 통해, 시간 지연 확산에 의한 성능 열화를 보상해 주고, 개선된 수신 SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)을 얻을 수 있다. PRC 기법은 STTC를 제안한 V. Tarokh 등이 STTC의 최대 우도 복호기를 대신할 간단한 구조의 복호기를 구현하기 위하여 제시한 전송 디버시티 신호에 적합한 컴바이닝 기법으로서, 본 논문에서는 다중 경로 페이딩 채널을 통과하여 수신되는 신호들을 컴바이닝하는데 사용되었다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 II장에서는 STTC 시스템과 채널 모델을 설명을 하였다. 제 III장에서는 PRC 기법에 관하여 설명하였다. 제 IV장에서는 본 논문에서 제안한 STTC CDMA 시스템

과 다중 경로 페이딩 채널에서의 최적, 준최적의 복호 방식에 관하여 설명하였다. 제 V장에서는 전산 모의실험을 통해 제안된 구조의 성능을 보여주고 있으며, 마지막으로 제 VI장은 결론과 차후의 연구 방향에 대해 서술하였다.

## II. STTC 시스템과 채널 모델

일반적인 STTC 시스템은  $n_T$ 개의 송신 안테나와  $n_R$ 개의 수신 안테나로 구성되며, 시간 t에 신호  $c_i^j$ 가 각각의 i번째 안테나로 전송된다. STTC 부호화과정은 트렐리스를 통하여 이루어지며, 부호화된 신호는 파형으로 발생되어 페이딩 채널을 통과한 후  $n_R$ 개의 안테나로 수신된다. 일반적으로 STTC 시스템에 대한 분석에서 주로 사용되어왔던, 준정적 레일레이 주파수 비선택적 페이딩 채널 모델(quasi-static Rayleigh flat fading channel model)에서의 시간 t에서 j번째 수신 안테나의 수신 신호는 (1)과 같다.

$$r_i^j = \sum_{i=1}^{n_T} a_{i,j} c_i^j + \eta_i^j, \quad j=1,2,\dots,n_R \quad (1)$$

여기서, 경로 이득  $a_{i,j}$ 는 복소 가우시안 랜덤 변수로서, 하나의 프레임 동안 동일하게 유지되다가, 프레임이 변할 때마다 바뀌는 준정적 특성을 가진다. 이와 같은 채널환경에서 ML 복호로 동작하는 수신단은 식 (2)과 같은 메트릭을 최소화하는 부호어로서 비터비 복호를 수행한다.

$$\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{n_R} \left| r_i^j - \sum_{i=1}^{n_T} a_{i,j} c_i^j \right|^2 \quad (2)$$

다중 경로 페이딩 채널 모델은 식 (3)과 같은 임펄스 응답에 의해서 모델링 될 수 있다.

$$a_{i,j}(t) = \sum_m a_{i,j}(t, m) \delta(t - \tau_m) \quad (3)$$

여기서,  $\tau_m$ 은 m번째 경로의 시간 지연이고,  $a_{i,j}(t, m)$ 는 m번째 경로의 시변 다중 경로 신호 성분이다. 일반적으로 이동 통신 환경의 채널 프로파일은 동일 이득 2-경로 프로파일(equal gain two-ray profile)로 모델링될 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$h(t) = E[|a_{i,j}(t)|^2] = \frac{1}{2} [\delta(t+\tau) + \delta(t-\tau)] \quad (4)$$

정규화된 RMS 지연 확산(normalized Root Mean Square delay spread)은  $d = \tau / T_s$ 로 정의된다. 여기서  $T_s$ 는 심벌시간이다. 물론, 채널은 준-정적인 성질을 가지므로, 프레임이 변할 때에 채널 이득이 바뀌는 다중 경로 준-정적 레일레이 페이딩 채널(multi-path quasi-static rayleigh fading channel)로 생각할 수 있다.

주파수 비선택적 채널에서의 설계 조건은 [1]에서 잘 설명되어져 있다. 본 논문에서는 [1]의 주 결과만을 요약하였다. 길이가  $l$ 인 식 (5)과 같은 부호어가 전송되었을 때,

$$C = c_1^1 c_1^2 \cdots c_1^{n_r} c_2^1 c_2^2 \cdots c_2^{n_r} \cdots c_l^1 c_l^2 \cdots c_l^{n_r} \quad (5)$$

최대우도 복호기가 식 (6)과 같은 오류어로 복호하였다면,

$$E = e_1^1 e_1^2 \cdots e_1^{n_r} e_2^1 e_2^2 \cdots e_2^{n_r} \cdots e_l^1 e_l^2 \cdots e_l^{n_r} \quad (6)$$

위 두 부호어의 차이로부터 차이 행렬(difference matrix),  $B(C, E)$ 을 얻을 수 있다.

$$B(C, E) = \begin{bmatrix} e_1^1 - c_1^1 & e_2^1 - c_2^1 & \cdots & e_l^1 - c_l^1 \\ e_1^2 - c_1^2 & e_2^2 - c_2^2 & \cdots & e_l^2 - c_l^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ e_1^{n_r} - c_1^{n_r} & e_2^{n_r} - c_2^{n_r} & \cdots & e_l^{n_r} - c_l^{n_r} \end{bmatrix} \quad (7)$$

또한,  $B(C, E)$ 와  $B(C, E)^*$ 의 곱으로부터 거리 행렬(distance matrix),  $A(C, E)$ 을 구할 수 있다.

$$A(c, e) = B(c, e)B^*(c, e) \quad (8)$$

주파수 비선택적 레일레이 페이딩 채널에서의 부호어와 오류어간의 오류 확률은 식 (9)과 같다.

$$P(C \rightarrow E) \leq \left( \prod_{i=1}^r \eta_i \right)^{n_k} \left( \frac{E_s}{4N_0} \right)^{-r n_k} \quad (9)$$

$\eta_i, i = 1, 2, \dots, r$ 은  $A(C, E)$ 의 0이 아닌 고유치들로서, STTC 부호화 이득을 결정하게 된다.  $r$ 은  $A(C, E)$ 의 계수(rank)로써, 디버시티 이득을 결정한다. 위의 식을 통해, V.Tarokh 등은 주파수 비선택적 레일레이 페이딩 채널에서의 STTC의 설계 조건으로 계수 조건(rank criterion)과 행렬식 조건(determinant criterion)을 제시하였다<sup>[11]</sup>.

다중 경로 준-정적 레일레이 페이딩 채널에서의 부호어와 오류어간의 오류 확률은 [2]에서 근사적인 방법을 통하여 구하여졌다. 특별히, 동일 이득 2-경

로 프로파일에 대하여 전개한 오류 확률은 식 (10)과 같다.

$$P(C \rightarrow E) \leq \left[ \prod_{i=1}^r \eta_i \frac{(1-d)^2 N_0}{3Nd^2 E_s + N_0} \right]^{n_k} \left( \frac{E_s}{4N_0} \right)^{-r n_k} \quad (10)$$

그러므로 식 (9)과 식 (10)을 비교하면, 다중 경로 페이딩 채널 하에서, STTC의 부호화 이득과 디버시티 이득이 열화되는 것을 알 수 있다. 이를 보상하기 위한, 시공간 등화기가 여러 연구들에서 제안되고 있지만, 시스템의 복잡도를 증가시키는 문제점을 가지고 있다.

### III. PRC(Principal Ratio combining) 기술

V. Tarokh은 STTC의 복잡한 ML 복호기를 대신할 간단한 구조의 수신단에 대한 연구로서, PRC 시스템을 제시하였다<sup>[3]</sup>. 이 시스템은 ML 복호기에 비해 상대적으로 성능은 떨어지지만, 적은 복잡도의 시스템을 구성할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 PRC의 주요한 원리만을 요약하여 수록한다<sup>[3][4]</sup>.

주파수 비선택적인 페이딩 채널에서의 식 (1)과 같은 수신 신호는  $\|A\| = 1$ 을 만족하는 벡터  $A = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_k})$ 에 의하여, 선형 컴바이닝 된다<sup>[3]</sup>. 컴바이닝된 새로운 신호는 식(11)과 같다.

$$R_i = \sum_{j=1}^{n_k} \lambda_j r_j^i = \sum_{j=1}^{n_k} \left[ \left( \sum_{i=1}^{n_k} \lambda_i \alpha_{i,j} \right) c_j^i \right] + \sum_{j=1}^{n_k} \lambda_j \eta_j^i \quad (11)$$

식 (11)을 식 (1)과 비교할 때, 새로운 페이딩 계수는  $\gamma_i = \sum_{j=1}^{n_k} \lambda_j \alpha_{i,j}$ 으로 되는 것을 볼 수 있다. 수

신단은  $\sum_{i=1}^{n_k} |\gamma_i|^2$ 를 최대화하는  $A$ 의 계산을 통해,

$R_i$ 가 모든 가능한  $c_j^i$ 에 대해, 더욱더 많은 정보를 가지게 된다. 반면, 가우시안 잡음은  $\|A\| = 1$ 에 의해 컴바이닝되어 상수로 남게 된다. 그러므로

$$\Omega_i = (\bar{\alpha}_{i,1}, \bar{\alpha}_{i,2}, \dots, \bar{\alpha}_{i,n_k}) \text{이고, } A = \sum_{i=1}^{n_k} \Omega_i^* \Omega_i \text{라}$$

하면, 식 (12)과 같은 식을 얻을 수 있다. 단,  $\bar{\alpha}$ 는  $\alpha$ 의 공액복소수(conjugate)이고,  $\Omega_i^*$ 는  $\Omega_i$ 의 공액 전치(conjugate transpose) 벡터이다.

$$\sum_{i=1}^{n_k} |\gamma_i|^2 = \Lambda \Lambda^* \quad (12)$$

수신단은  $\|A\|=1$ 를 만족하면서,  $\Lambda A A^*$ 를 최대화하는  $\Lambda$ 를 찾는 연산을 해야 한다. 그런데, 이  $\Lambda$ 는  $A$ 의 고유값 중 최대인 고유값의 고유벡터가 된다. 그러므로 수신단은  $A$ 와  $\Lambda$ 를 계산한 후,  $\gamma_i, i=1,2,\dots,n_T$ 와  $R_t, t=1,2,\dots,T$ 을 계산하게 된다. 그러므로 모든 가능한 부호어에 대하여, 식 (13)과 같은 메트릭을 최소화하는 부호어로서 복호하게 된다.

$$\sum_t \left| R_t - \sum_i \gamma_i c_i^t \right|^2 \quad (13)$$

식 (13)을 (2)과 비교하면,  $n_r$ 에 따른 복잡도가 사라졌음을 알 수 있다. 반면, 매 프레임마다의  $A$ 와  $\Lambda$ 의 고유값과 고유치를 계산하는 연산과정이 추가된다.

#### IV. STTC CDMA 시스템과 최적, 준최적 복호 방식

본 논문에서 제안하는 STTC CDMA 시스템은 그림 1과 같다. 이 시스템은 일반적인 STTC 시스템의 송수신단에 CDMA 시스템에서 사용되고 있는 PN 부호의 확산, 역확산 과정을 추가하여 구성할 수 있다. 모든 송신 안테나는 동일한 PN 부호를 사용하고 있으며, 결과적으로 ML 복호를 사용한 STTC에 의하여 얻어질 수 있는 최대 디버시티 이득과 부호화 이득은 그대로 얻어지게 된다. 또한, PN 부호를 사용하였기 때문에, 다중 경로 페이딩 채널 환경에서의 다중 경로에 의한 성능열화에 대한 면역성을 가지게 된다. 다중 경로 페이딩 채널 환경 하에서, 송신단은 송신 신호에 PN 부호를 곱하여 송신하고, 수신단은 PN 부호를 이용하여 다중 경로를 구분하여 컴바이닝한다. 이 시스템의 디버시티 이득은 기존의 STTC가 가지고 있던 송신 안테나와 수신 안테나의 개수 만큼에 또한 컴바이닝되는 다중 경로의 개수만큼이 증가하게 된다. 여기서,

송신 안테나는 각각 다른 PN 부호를 사용하는 것이 아니라, 모두 같은 PN 부호를 사용하고 있어, 수신단은 송신 안테나를 구분하지는 못하지만, 다중 경로를 구분하여 수신할 수 있다. 컴바이닝 기법으로는 제 3장에서 소개한 PRC 기법을 사용하고 있다. STTC 신호는 여러 개의 다른 정보 신호를 포함하기 때문에, 일반적으로 잘 알려진 MRC (Maximal Ratio Combining) 기법은 사용할 수 없다.

#### V. STTC CDMA 시스템과 최적, 준최적 복호 방식

본 논문에서 제안하는 STTC CDMA 시스템은 그림 1과 같다. 이 시스템은 일반적인 STTC 시스템의 송수신단에 CDMA 시스템에서 사용되고 있는 PN 부호의 확산, 역확산 과정을 추가하여 구성할 수 있다. 모든 송신 안테나는 동일한 PN 부호를 사용하고 있으며, 결과적으로 ML 복호를 사용한 STTC에 의하여 얻어질 수 있는 최대 디버시티 이득과 부호화 이득은 그대로 얻어지게 된다. 또한, PN 부호를 사용하였기 때문에, 다중 경로 페이딩 채널 환경에서의 다중 경로에 의한 성능열화에 대한 면역성을 가지게 된다. 다중 경로 페이딩 채널 환경 하에서, 송신단은 송신 신호에 PN 부호를 곱하여 송신하고, 수신단은 PN 부호를 이용하여 다중 경로를 구분하여 컴바이닝한다. 이 시스템의 디버시티 이득은 기존의 STTC가 가지고 있던 송신 안테나와 수신 안테나의 개수 만큼에 또한 컴바이닝되는 다중 경로의 개수만큼이 증가하게 된다. 여기서, 송신 안테나는 각각 다른 PN 부호를 사용하는 것이 아니라, 모두 같은 PN 부호를 사용하고 있어, 수신단은 송신 안테나를 구분하지는 못하지만, 다중 경로를 구분하여 수신할 수 있다. 컴바이닝 기법으로는 제 3장에서 소개한 PRC 기법을 사용하고 있다. STTC 신호는 여러 개의 다른 정보 신호를 포함하기 때문에, 일반적으로 잘 알려진 MRC (Maximal Ratio Combining) 기법은 사용할 수 없다.

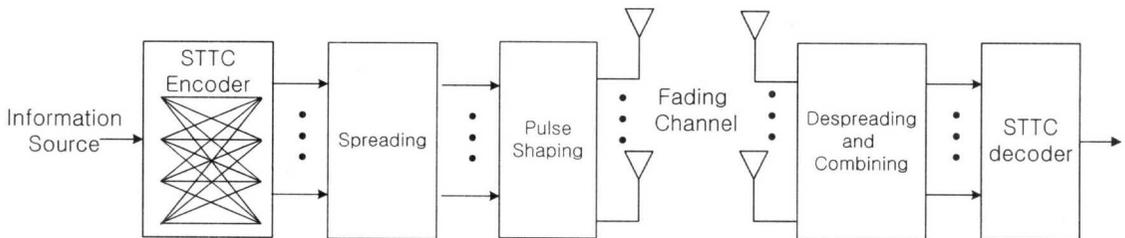


그림 1. STTC CDMA 시스템 모델

수신단에서 역확산 시스템이 PN 부호의 완벽한 동기화를 찾아 역확산하고, 다중경로에 대한 완벽한 검출을 해준다고 가정할 때, 다중 경로가 존재하는 페이딩 환경에서의 수신신호는 시간 지연된 수신 신호가 총  $D$ 개 존재한다. 수신 신호는 식 (14)처럼 쓸 수 있다.

$$r^j(d) = \sum_{i=1}^{n_r} \alpha_{i,j}(d) c_i^j + \eta^j(d), \quad d=0, 1, \dots, D-1 \quad (14)$$

다중 경로에 따른 페이딩 계수  $\alpha_{i,j}(d)$ 는 레일레이 페이딩 계수로서, 본 논문에서는 다중 경로의 시간 지연에 따른 상관관계는 독립적인 것으로 가정하였다. 본 논문에서는 채널이 준정적이라고 가정하였기 때문에,  $\alpha_{i,j}(d)$ 는 프레임 단위로 일정하다가 프레임이 바뀔 때에, 변하게 된다.

1. (A) 최적 복호 방식 (ML 복호 방식)

만약, 컴바이닝을 하지 않고, (14)의 모든 수신된 신호들을 사용하여 ML 복호를 한다면, 최적의 복호 방식이 될 수 있다. 이 방식에서 얻을 수 있는 디버시티 이득은 송수신 안테나의 개수에서 컴바이닝된 다중 경로의 수만큼이 증가하게 된다. 이 복호 방식은 식 (15)과 같은 메트릭을 최소화하는 부호어를 찾는 과정으로서, 다중 경로 신호 수 만큼의 비터비 복호 과정의 복잡도가 증가하지만, 많은 성능 향상을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_r} \left| \sum_{d=0}^{D-1} r^j(d) - \sum_{i=1}^{n_r} \alpha_{i,j}(d) c_i^j \right|^2 \quad (15)$$

2. (B) 안테나별로 다중 경로 신호를 합하여 복호하는 방식

각각의 수신 안테나가 수신된 다중 경로 신호들에 어떠한 이득도 곱하지 않고, 단순히 더한 후 복호할 수 있다. 안테나 별로 다중 경로 신호를 합한 새로운 신호를  $r^j$ 라 하고, 이 과정에서 또한 합으로 얻어진 새로운 페이딩 계수를  $\alpha_{i,j}$ 라 하면, 이후 복호 과정에서는 식 (16)과 같은 메트릭을 가지고 비터비 복호를 하게 된다. 식 (16)은 식 (2)과 동일한 복잡도임을 알 수 있다. 그러므로 만약 다중 경로를 이상적으로 검출한다면, 이 복호 방식은 주파수 비선형적 페이딩 채널에서의 일반적인 STTC 시스템의 성능과 동일한 성능을 보일 것이다. 또한, 복호 과정에 있어서는 수신 신호를 더하는 연산 과정이 추가되었고, 비터비 복호 과정에서의 복잡도의

증가는 없다.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_r} \left| r^j - \sum_{i=1}^{n_r} \alpha_{i,j} c_i^j \right|^2 \quad (16)$$

$$= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_r} \left| \sum_{m=0}^{D-1} r^j(m) - \sum_{i=1}^{n_r} \left( \sum_{m=0}^{D-1} \alpha_{i,j}(m) \right) c_i^j \right|^2$$

3. (C) 안테나별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 복호하는 방식

각각의 안테나별로 수신된 신호를 PRC한 후 복호하면, 부가적인 PRC 이득을 얻을 수 있다. 이 과정에서 얻어지는 각각의 안테나 별로 새로운 신호 성분,  $r^j$ 와 새로운 페이딩 계수 성분,  $\alpha_{i,j}$ 는  $r^j(d)$ ,  $d=0, 1, \dots, D-1$ 와 다중 경로 채널 페이딩 성분,  $\alpha_{i,j}(d)$ ,  $d=0, 1, \dots, D-1$ 를 PRC한 결과가 된다. 복호 과정에서는 식 (2)과 동일한 메트릭을 가지고 비터비 복호를 하게 된다. 이 방식은 B 방식에 비해 PRC 연산을 하는 복잡도가 증가하지만, 비터비 복호과정에서의 복잡도의 증가는 없다. 또한 B 방식에 비해, PRC 이득만큼의 성능 향상을 보인다.

4. (D) 모든 수신 신호를 PRC한 후 복호하는 방식

다중 경로 페이딩 채널을 통해 수신된 모든 안테나의 모든 신호들을 모두 PRC 한 후에 복호하는 방식을 생각할 수 있다. 이 방식은 비터비 복호기의 복잡도 측면에서는 가장 적은 복잡도를 보이지만, 위에서 설명한 다른 방식에 비해 가장 안 좋은 성능을 보일 것이라 예측할 수 있다.  $R_i$ 와  $\gamma_i$ 는  $r^j(d)$ ,  $d=0, 1, \dots, D-1$ ,  $j=1, 2, \dots, n_r$ 과 페이딩 계수를 PRC하여 얻어진다. 이후의 비터비 복호 과정은 식 (13)과 같은 메트릭을 최소화하는 복호과정 이 된다.

V. 모의실험 결과

모의실험에 사용한 STTC 부호는 V. Tarokh 등의 4-states 4PSK STTC와 8-states 8PSK STTC이다<sup>[1]</sup>. 채널 환경은 준정적 다중 경로 레일레이 페이딩 채널을 사용하였으며, 전력 프로파일로는 동일 이득 2-경로 프로파일과 4-경로 지수 프로파일을 사용하였다<sup>[5]</sup>. 송신단은 IS-95에서 사용하고 있는 PN 부호로 STTC 심벌을 확산하여 송신하며, 수신단은 이상적인 RAKE 수신기라고 가정하였다. 이상적인 채널 추정을 한다고 가정하였고, Monte-Carlo 시물

레이션을 통하여 성능을 분석하였다. 시뮬레이션에서 사용한 동일 이득 2-경로 프로파일과 4-경로 지수 프로파일은 각각 식 (17), (18)과 같다.

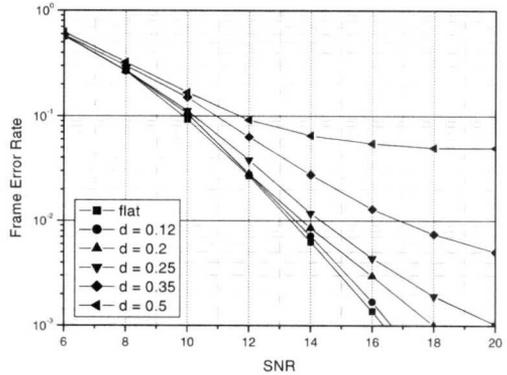
$$h(t) = 0.5\delta(t) + 0.5\delta(t - T_c) \quad (17)$$

$$h(t) = 0.3499\delta(t) + 0.2726\delta(t - T_c) + 0.2122\delta(t - 2T_c) + 0.1652\delta(t - 3T_c) \quad (18)$$

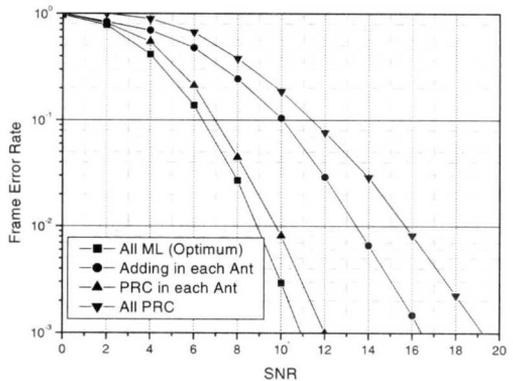
여기서,  $h(t)$ 는 단위 에너지를 갖도록 제한하였다. 제 4장에서 설명한 최적, 준최적 복호방식에 의한 다중 경로 페이딩 채널에서의 성능은 그림 2와 그림 3에 잘 나타나있다. 그림 2는 4-states 4PSK STTC를, 그림 3은 8-states 8PSK STTC를 사용하였다. 그림 2와 그림 3에서 (a)는 4-states 4PSK STTC와 8-states 8PSK STTC의 다중 경로 페이딩 채널 하에서의 지연 확산 값의 증가에 따른 FER 성능 열화를 보여주고 있다. (b)는 STTC CDMA 시스템에서의 복호 방식에 따른 성능 변화를 보여주고 있다. 각각 송신 안테나는 2개, 수신 안테나는 2개를 사용하였다. 두 그림의 (a)에서 볼 수 있듯이, 다중 경로 페이딩 채널에서의 지연 확산에 의한 성능 열화는 SNR이 커질수록 증가하며,  $d \geq 0.25$ 인 영역에서는 SNR이 증가하여도 STTC의 성능이 거의 개선되지 않음을 볼 수 있다. 이를 ISI (Inter Symbol Interference)에 의한 정정할 수 없는 오류율(irreducible error rate)이라 부른다<sup>[2]</sup>.

그림 2 (b)와 그림 3 (b)에서는 STTC CDMA 시스템을 사용했을 때의 복호 방식에 따른 FER 성능을 보여주고 있으며, 모든 신호들을 ML 방식으로 복호하는 최적 복호 방식이 가장 좋은 성능을 보였다. 수신 안테나 별로 다중 경로를 PRC하고 복호하는 방법이 안테나별로 다중 경로 신호들을 단순히 합하고 복호하는 방식보다 우수한 오류 성능을 보였다. 이는 PRC 기법의 컴바이닝 이득으로서, FER  $10^{-2}$ 에서 약 4dB 정도의 이득을 보이고 있다. 안테나별로 다중 경로 신호들을 단순히 합하고 복호하는 방식은 주파수 비선택적 페이딩 채널의 성능과 거의 동일한 성능을 보였다. 반면, 모든 수신신호들을 컴바이닝하여 복호하는 가장 복잡도가 낮은 복호 방식은 가장 안 좋은 성능을 보이고 있다.

또한, 그림 2와 그림 3은 4가지의 복호 방법이 다중 경로 페이딩 채널에서의 일반적인 STTC 시스템의 성능 열화에 비해 얼마나 개선되고 있는지를 보여주고 있다. 지연 확산이 작은 구간에서의 STTC

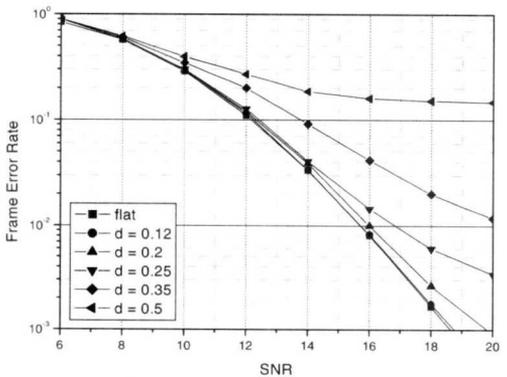


(a) 지연 확산에 따른 4-states 4PSK STTC의 FER 성능

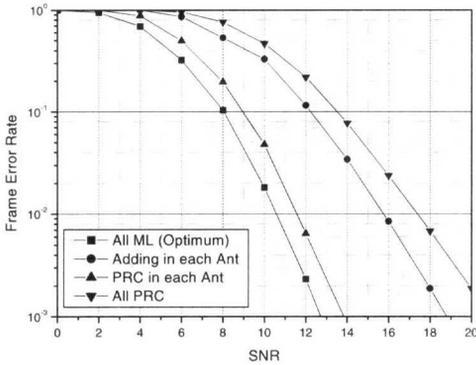


(b) 복호 방식에 따른 4-states 4PSK STTC-CDMA의 FER 성능

그림 2. 동일 이득 2-경로 프로파일의 다중 경로 페이딩 채널에서의 4-states 4PSK STTC와 4-states 4PSK STTC CDMA 시스템의 FER 성능 비교 (2개의 송신, 2개의 수신 안테나 사용, 컴바이닝한 다중 경로 수 = 2개)



(a) 지연 확산에 따른 8-states 8PSK STTC의 FER 성능



(b) 복호 방식에 따른 8-states 8PSK STTC-CDMA 시스템의 FER 성능

그림 3. 동일 이득 2-경로 프로파일의 다중 경로 페이딩 채널에서의 8-states 8PSK STTC와 8-states 8PSK STTC CDMA 시스템의 FER 성능 비교 (2개의 송신, 2개의 수신 안테나 사용, 컴바이닝한 다중 경로 수 = 2개)

의 성능 열화는 거의 없다는 것을 이미 보여 주었다. 하지만, 두 그림에서 볼 수 있듯이, 최적 복호 방식과 안테나 별로 PRC한 후 복호하는 방식은  $d=0.12$ 인 환경에 비해, FER  $10^{-2}$ 에서 4-states 4PSK STTC는 약 4.5dB, 4dB의 이득이 있다는 것을 알 수 있다. 모든 수신 신호를 PRC하는 기법은 지연 확산이 작은 구간에서는 오히려 컴바이닝을 하지 않은 것보다 못한 성능을 보인다. 하지만, 지연 확산이 상대적으로 큰 구간에서 나타나는 정정할 수 없는 오류율(irreducible error rate)에 대한 보완의 역할을 충분히 하고 있다. 본 논문에서 제안한 4가지 방식 중, 특별히 안테나 별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 복호하는 방식은 최적의 ML 복호 방식에 비하여 낮은 복잡도로 유사한 성능을 얻을 수 있었다.

그림 4는 4-경로 지수 프로파일을 갖는 다중 경로 페이딩 채널에서, 안테나 별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 ML복호하는 방식의 성능을 컴바이닝하는 경로의 수에 따라 보여주고 있다. 컴바이닝하는 경로는 4경로 중, 가장 수신 전력이 높은 것들을 취했다. 즉, 그림의 "select 1"은 4개의 경로 중 가장 수신 전력이 높은 경로를 선택하여, ML복호를 한 수신 방식이고, "PRC 2", "PRC 3", "PRC 4"는 4개의 경로 중 각각 2, 3, 4개의 수신 전력이 높은 경로를 택하여, PRC한 후 복호하는 방식이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 안테나 별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 ML 복호하는 방식은 컴바이닝하는 개수

에 따라 좋은 성능을 얻을 수 있으며, 최적의 ML 복호 방식에 비하여 낮은 복잡도로 유사한 성능을 얻을 수 있었다.

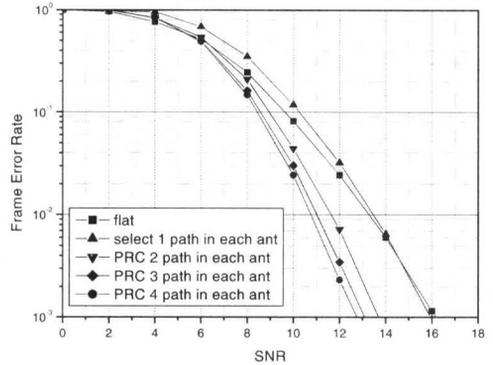


그림 4. 4-경로 지수 프로파일 다중 경로 페이딩 채널에서의 4-states 4PSK STTC-CDMA 시스템의 안테나 별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 ML 복호하는 방식의 컴바이닝 수에 따른 FER 성능 (2개의 송신, 2개의 수신 안테나 사용)

## VI. 결론

다중 경로 페이딩 채널에서의 시공간 트렐리스 부호 (STTC, Space-Time Trellis Codes)의 성능 열화를 보완하기 위한 시공간 등화기는 수신기를 복잡하게 하는 단점이 있다. 본 논문에서는 시공간 트렐리스 부호화 CDMA 시스템 (STTC CDMA)과 다중 경로 페이딩 채널에서의 최적, 준최적 복호 방식을 제안하였다. 이 시스템은 다중 경로를 거쳐 수신된 신호를 PRC (Principal Ratio Combining) 기법을 사용하여 컴바이닝하여 수신 SINR (Signal to Interference and Noise Ratio)을 개선한 후, 복호하는 방식을 사용하고 있다. 물론, 각각의 안테나는 동일한 PN 부호를 사용하고 있다. 수신단은 송신 안테나를 구분할 수는 없지만, PN 부호를 이용한 다중 경로의 구분이 가능하고, RAKE 수신기를 이용하여 다중 경로를 컴바이닝하면 수신기에서 많은 이득을 얻을 수 있게 된다. 컴바이닝과 복호 방식에 따라, 모든 신호들을 ML 복호하는 최적의 복호 방식, 각각의 수신 안테나 별로 다중 경로 신호를 단순히 합하여 복호하는 방식, 각각의 수신 안테나 별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 복호하는 방식, 그리고 모든 수신 신호들을 PRC한 후 복호하는 방식이 있으며, 이 방식들은 복잡도에 비례하여 좋은 성능을 보인다. 이 방식들은 복잡도에 비례하여 좋은 성능을 보이며, 4가지 방식들 모두 다중 경로 환경

에서 발생하는 정정할 수 없는 오류율(irreducible error rate)을 제거할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 특별히, 안테나 별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 ML 복호하는 방식은 최적의 ML 복호 방식에 비하여 낮은 복잡도로 유사한 성능을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 44, pp. 744-765, March 1998

[2] Y. Gong and K. B. Letaief, "Performance Evaluation and Analysis of Space-Time Coding in Unequalized multipath Fading Links", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 48, pp. 1778-1782, November 2000

[3] V. Tarokh and T. K. Y. Lo, "Principal Ratio Combining for Fixed Wireless Applications when Transmitter Diversity is Employed", *IEEE commun. Lett.*, vol. 2, pp. 223-225, Aug. 1998.

[4] Y. J. Kim and H. S. Lee, "Generalized Principal Ratio Combining for Space-Time Codes in Slowly Fading Channels", *IEEE commun. Lett.*, vol. 4, pp. 343-345, November. 2000.

[5] J. C-I Chuang, "The Effects of Time Delay Spread on Portable Radio Communications Channels with Digital Modulation", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. SAC-5, pp. 879-889, June 1987

[6] P. V. Rooyen, M. Lotter, and D. V. Wyk, "Space-Time Processing for CDMA Mobile Communications," *Kluwer Academic Publishers*, 2000

기 영 민(Young Min Ki) 정회원



2000년 2월 : 연세대학교  
기계전자공학부 졸업  
2002년 2월 : 연세대학교  
전기전자공학과 석사  
2002년 3월 ~현재 : 연세대학교  
전기전자공학과 박사과정

<주관심 분야> MIMO, 무선네트워크, 다중접속기술, 채널 스케줄러, 무선 MAC 프로토콜

임 은 정(Eun Jeong Yim) 정회원



1998년 2월 : 연세대학교  
전파공학과 졸업  
2000년 2월 : 연세대학교  
전기컴퓨터공학과 석사  
2000년 3월 ~현재 : 연세대학교  
전기전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 채널부호기술, 시공간부호, MIMO 시스템, 채널추정기법, CDMA 이동통신

정 보 훈(Bo Hun Chung) 정회원



2001년 2월 : 연세대학교  
기계전자공학부 졸업  
2001년 3월 ~현재 : 연세대학교  
전기전자공학과 석사과정

<주관심 분야> 디지털통신, 채널부호기술, 이동통신, MIMO 시스템

김 동 구(Dong Ku Kim) 정회원



1983년 2월 : 한국항공대학교  
통신공학과 졸업  
1985년 : U.S.C. Dept. of  
Electrical Engineering  
석사  
1992년 : U.S.C. Dept. of  
Electrical Engineering  
박사

1999년 ~현재 : 연세대학교 공과대학 기계전자공학부  
부교수

<주관심 분야> CDMA 이동통신, 다중접속 기술, 변조 및 채널 부호화 기술, 스케줄링/MAC 기술, 순방향링크 빔성형 기술 및 MIMO 기술, UWB, Binary CDMA