

시공간 트렐리스 부호화 CDMA 시스템의 최적, 준최적 복호 방식과 성능 연구

Optimum and Sub-optimum Decoding Methods of Space-Time Trellis Coded Code Division Multiple Access Systems

기 영 민*, 김 동 구*

Young Min Ki* and Dong Ku Kim*

요 약

본 논문은 STTC(Space-Time Trellis Codes)의 다이버시티 이득과 부호화 이득을 그대로 유지하면서, 다중 경로 페이딩 채널 환경에서의 성능 열화에 대한 면역성을 가진 STTC CDMA 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 STTC 시스템에 PN(Pseudo Noise) 부호의 확산, 역확산 과정을 추가하여 구성할 수 있다. 다중 경로 페이딩 채널 환경에서 제안된 시스템은 다중 경로 신호를 검출한 후, PRC(Principal Ratio Combining)를 하고 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 있다. 이 방식들은 복잡도에 비례하여 좋은 성능을 보이며, 4가지 방식들 모두 다중 경로 페이딩 채널 환경에서 발생하는 정정할 수 없는 오류율(irreducible error rate)을 제거함을 알 수 있다.

ABSTRACT

We present Space-Time Trellis Coded Code Division Multiple Access systems, which maintain the full diversity and coding gain of Space-Time Trellis Codes (STTC) and have the immunity to performance degradation caused by multipath fading. These STTC CDMA systems are constructed by adding the spreading and despreading processes of PN codes to STTC systems. In multipath fading channels, delay spreaded signals are detected and combined, then decoded. 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. Performance of these methods is proportional to complexity. Besides, all methods are shown to compensate the irreducible error rate which appears in multipath fading channels.

I. 서 론

4세대 이동 통신 시스템의 채널 부호로서 연구되

어지고 있는 STTC(Space-Time Trellis Codes)는 TCM(Trellis Coded Modulation)을 기반으로 설계된 MIMO(Multi Input Multi Output) 기술의 한 부류로서 V. Tarokh 등에 의해 제안되었다[1]. 이들은

* 연세대학교 전기전자공학과(School of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University)

· 논문번호 : 2002-8-5

· 접수일자 : 2002년 7월 16일

페이딩 채널에서의 STTC의 설계 조건을 제시하였으며, 이 설계 조건은 이후에 제시된 STTC 시스템들에서 가장 중요한 설계 조건으로서 사용되어왔다 [1]. Y. Gong 등은 V. Tarokh 등이 설계 조건에서 사용한 부호어와 오류어간의 오류 확률이, 다중 경로 페이딩 채널 하에서는 달라져야 한다는 사실을 보이고, 새로운 오류 확률을 구하였으며, 지연확산이 큰 다중 경로 페이딩 채널에서의 정정 불가능한 오류율(irreducible error rate)의 존재를 분석적으로 증명하였다[2]. STTC를 제안한 V. Tarokh은 복잡한 STTC의 최대 우도 복호기를 대신할 수 있는 간단한 구조의 복호기에 대한 연구를 통해, PRC (Principle Ratio Combining)라는 STTC 신호에 적합한 컴바이닝 기법을 제시하였다[3]. 이후, Y. J. Kim 등은 PRC 기법을 일반화한 GPRC(Generalized Principal Ratio Combining) 기법을 제안하였다[4].

본 논문은 STTC의 최대 디버시티 이득과 부호화 이득을 그대로 유지하면서, CDMA(Code Division Multiple Access) 시스템의 장점인 다중 경로 페이딩 채널에서의 성능 열화에 대한 면역성을 갖는 STTC CDMA 시스템을 제안하였다. 다중 경로 페이딩 채널에서 STTC CDMA 시스템은 PN(Pseudo noise) 부호를 이용한 다중 경로의 검출과 PRC 기법을 사용한 다양한 컴바이닝 방법을 통해, 다중 경로 페이딩에 의한 성능 열화를 보상해 주고, 부가적인 컴바이닝 이득을 얻고 있다.

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 시스템과 다중 경로 페이딩 채널에서의 최적, 준최적의 복호 방식에 관하여 설명하였다. 제 V장에서는 전산 모의 실험을 통해 제안된 구조의 성능을 보여주고 있으며, 마지막으로 제 VI장은 결론과 차후의 연구방향에 대해 서술하였다.

II. STTC 시스템과 채널 모델

일반적인 STTC 시스템은 n_T 개의 송신 안테나와 n_R 개의 수신 안테나로 구성되며, 시간 t 에 신호

c_i^j 가 각각의 i 번째 안테나로 전송된다. STTC 부호화 과정은 트렐리스를 통하여 이루어지며, 부호화된 신호는 파형으로 발생되어 페이딩 채널을 통과한 후 n_R 개의 안테나로 수신된다. 일반적으로 STTC 시스템에 대한 분석에서 주로 사용되어왔던, 준-정적 레일레이 주파수 비선택적 페이딩 채널 모델(quasi-static rayleigh flat fading channel model)에서의 시간 t 에서 j 번째 수신 안테나의 수신 신호는 식 (1)과 같다.

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

여기서, 경로 이득 $\alpha_{i,j}$ 는 복소 가우시안 랜덤 변수로서, 하나의 프레임 동안 동일하게 유지되다가, 프레임이 변할 때마다 바뀌는 준-정적 특성을 가진다. 이와 같은 채널환경에서 ML복호로 동작하는 수신단은 식 (2)와 같은 메트릭을 최소화하는 부호어로서 비터비 복호를 수행한다.

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

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

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

여기서, τ_m 은 m 번째 경로의 시간 지연이고, $\alpha_{i,j}(t, m)$ 는 m 번째 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[5].

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

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)와 같은 부호어가 전송되었을 때,

$$C = c_1^1 c_1^2 \dots c_1^r c_2^1 c_2^2 \dots c_2^r \dots c_l^1 c_l^2 \dots c_l^r \quad (5)$$

최대우도 복호기가 식 (6)과 같은 오류어로 복호하였다면,

$$E = e_1^1 e_1^2 \dots e_1^r e_2^1 e_2^2 \dots e_2^r \dots e_l^1 e_l^2 \dots e_l^r \quad (6)$$

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

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

또한, $B(C, E)$ 와 $B(C, E)^*$ 의 곱으로부터 거리 행렬(distance matrix) $A(C, E)$ 를 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)와 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 고유치들으로써, 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[1].

다중 경로 준-정적 레일레이 페이딩 채널에서의 부호어와 오류어간의 오류 확률은 [2]에서 근사적

인 방법을 통하여 구하여졌다. 특별히, 동일 이득 2-경로 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)와 비교할 때, 디버시티 이득을 결정하는 부분은 동일하나 부호화 이득을 결정하는 부분이 달라졌음을 알 수 있다. 식 (10)을 고려할 때, 기존의 설계 조건을 만족하는 STTC는 다중 경로 페이딩 채널 환경에서도 동일한 디버시티 이득을 제공함을 알 수 있다. 그러나, 부호화 이득은 지연 확산이 큰 환경에서 많은 열화가 발생할 것이라 예측된다.

III. PRC(Principal Ratio Combining) 기술

V. Tarokh은 STTC의 복잡한 ML 복호기를 대신 할 간단한 구조의 수신단에 대한 연구로서, PRC 시스템을 제시하였다[3]. 이 시스템은 ML 복호기에 비해 상대적으로 성능은 떨어지지만, 적은 복잡도의 시스템을 구성할 수 있다는 장점이 있다. Y. J. Kim 등은 수신안테나가 다수인 시스템에서, PRC를 보다 더 일반적으로 정리한 GPRC 기법을 제시하였다. 또한, 이들은 GPRC 시스템의 성능을 반영해주는 성능 지수(performance index)를 정의하였다[4]. 본 논문에서는 PRC의 주요한 원리만을 요약하여 수록한다.

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 [3]. 컴바이닝된 새로운 신호는 식 (11)과 같다.

$$R_i = \sum_{j=1}^{n_k} \lambda_j r_i^j = \sum_{i=1}^{n_k} \left[\left(\sum_{j=1}^{n_k} \lambda_j \alpha_{i,j} \right) c_i^j \right] + \sum_{j=1}^{n_k} \lambda_j \eta_i^j \quad (11)$$

식 (11)을 식 (1)과 비교할 때, 새로운 페이딩 계

수는 $\gamma_i = \sum_{j=1}^{n_k} \lambda_j \alpha_{i,j}$ 으로 된다는 것을 알 수 있다.

수신단은 $\sum_{i=1}^{n_r} |\gamma_i|^2$ 를 최대화하는 Λ 의 계산을 통해,

R_i 가 모든 가능한 c_i 에 대해, 더욱더 많은 정보를 가지게 된다. 반면, 가우시안 잡음은 $\|\Lambda\|=1$ 에 의해 컴바이닝되어 상수로 남아 있다. 그러므로, $\Omega_i = (\bar{\alpha}_{i,1}, \bar{\alpha}_{i,2}, \dots, \bar{\alpha}_{i,n_k})$ 이고, $A = \sum_{i=1}^{n_r} \Omega_i^* \Omega_i$ 라 하면, 식 (12)와 같은 식을 얻을 수 있다. 단, $\bar{\alpha}$ 는 α 의 공액복소수(conjugate)이고, Ω_i^* 는 Ω_i 의 공액 전치(conjugate transpose) 벡터이다.

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

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

$$\sum_{i=1}^{n_r} \left| R_i - \sum_{j=1}^{n_k} \gamma_j c_j \right|^2 \quad (13)$$

식 (13)을 식 (2)와 비교하면, n_R 에 따른 복잡도가 사라졌음을 알 수 있다. 반면, 매 프레임마다의 A 와 Λ 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 컴바이닝 되는 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.

수신단에서 역확산 시스템이 PN 부호의 완벽한 동기를 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.

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

다중 경로에 따른 페이딩 계수 $\alpha_{i,j}(d)$ 는 레일레

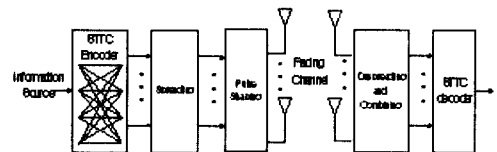


그림 1. STTC CDMA 시스템 모델
Fig. 1. STTC CDMA System Model.

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

4-1 최적 복호 방식 (ML 복호 방식)

만약, 컴바이닝을 하지 않고, 식 (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)와 같은 메트릭을 최소화하는 부호어를 찾는 과정으로서, 다중 경로 신호 수 만큼의 비터비 복호 과정의 복잡도가 증가하지만, 많은 성능 향상을 얻을 수 있다.

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

4-2 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_i^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)와 동일한 복잡도임을 알 수 있다. 그러므로, 만약 다중 경로를 이상적으로 검출한다면, 이 복호 방식은 주파수 비선택적 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.

$$\sum_{i=1}^{n_R} \left| r_i^j - \sum_{i=1}^{n_R} \alpha_{i,j} c_i^j \right|^2$$

$$= \sum_{i=1}^{n_R} \sum_{j=1}^{n_R} \left| \sum_{m=0}^{D-1} r_i^j(m) - \sum_{i=1}^{n_R} \left(\sum_{m=0}^{D-1} \alpha_{i,j}(m) \right) c_i^j \right|^2 \quad (16)$$

4-3 안테나별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 복호하는 방식

각각의 안테나별로 수신된 신호를 PRC한 후 복호하면, 추가적인 PRC 이득을 얻을 수 있다. 이 과정에서 얻어지는 각각의 안테나 별로의 새로운 신호 r_i^j 와 새로운 페이딩 계수 $\alpha_{i,j}$ 는 $r_i^j(d)$, $d=0, 1, \dots, D-1$ 와 다중 경로 채널 페이딩 성분, $\alpha_{i,j}(d)$, $d=0, 1, \dots, D-1$ 를 PRC한 결과가 된다. 복호 과정에서는 식 (2)와 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.

4-4 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. 새로운 신호 R_j 와 새로운 페이딩 계수 γ_i 는 $r_i^j(d)$, $d=0, 1, \dots, D-1$, $j=1, 2, \dots, n_R$ 과 다중 경로 페이딩 성분, $\alpha_{i,j}(d)$, $d=0, 1, \dots, D-1$, $j=1, 2, \dots, n_R$ 를 PRC하여 얻어진다. 이후의 비터비 복호 과정은 식 (13)과 같은 메트릭을 최소화하는 복호과정이 된다.

V. 모의 실험 결과

모의 실험에 사용한 STTC 부호는 V. Tarokh 등의 4-states 4PSK STTC와 8-states 8PSK STTC이다[1]. 채널 환경은 준-정적 다중 경로 레일레이 페이딩 채널을 사용하였으며, 전력 프로파일로는 동

일 이득 2-경로 프로파일을 사용하였다. 송신단은 IS-95에서 사용하고 있는 PN 부호로 STTC 심벌을 확산하여 송신하며, 수신단은 이상적으로 역확산과 다중 경로 신호를 검출한다고 가정하였다. 제 4장에서 설명한 최적, 준최적 복호방식에 의한 다중 경로 페이딩 채널에서의 성능은 그림 2와 그림 3에 잘 나타나 있다. 그림 2는 4-states 4PSK STTC를, 그림 3은 8-states 8PSK STTC를 사용하였다. 송신 안테나는 2개, 수신 안테나는 2개를 사용하였다. 두 그림에서 볼 수 있듯이, 모든 신호들을 ML 방식으로 복호하는 A의 최적 복호 방식이 가장 좋은 성능을 보였다. C의 수신 안테나 별로 다중 경로를 PRC하고 복호하는 방법이 B의 안테나별로 다중 경로 신호들을 단순히 합하고 복호하는 방식보다 우수한 오류 성능을 보였다. 이는 PRC 기법의 컴바이닝 이득으로서, FER 10^{-1} 에서 약 3dB 정도의 이득을 보이고 있다. B의 안테나별로 다중 경로 신호들을 단순히 합하고 복호하는 방식은 예상대로 일반적인 주파수

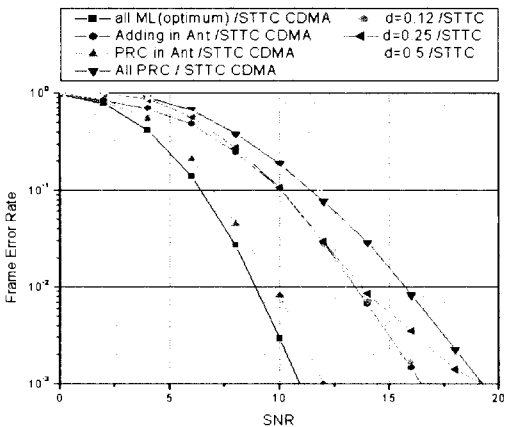


그림 2. 다중 경로 페이딩 채널에서의 4-states 4PSK STTC와 4-states 4PSK STTC-CDMA 시스템의 FER 성능 비교 (2개의 송신, 2개의 수신 안테나 사용, 컴바이닝한 다중 경로 수=2개)

Fig. 2. FER versus SNR performance of the 4-states 4PSK STTC CDMA system and conventional 4-states 4PSK STTC system in the multipath fading channels (2 transmit and 2 receive antennas and the number of combining paths = 2).

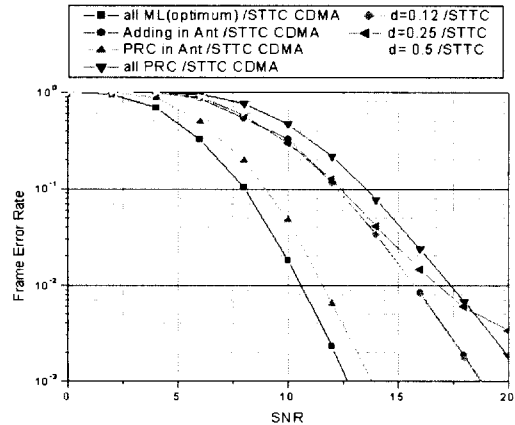


그림 3. 다중 경로 페이딩 채널에서의 8-states 8PSK STTC와 8-states 8PSK STTC-CDMA 시스템의 FER 성능 비교 (2개의 송신, 2개의 수신 안테나 사용, 컴바이닝한 다중 경로 수 = 2개)

Fig. 3. FER versus SNR performance of the 8-states 8PSK STTC CDMA system and conventional 8-states 8PSK STTC system in the multipath fading channels (2 transmit and 2 receive antennas and the number of combining paths = 2).

비선택적 페이딩 채널의 성능과 거의 동일한 성능을 보였다. 반면, 모든 수신신호들을 컴바이닝하여 복호하는 가장 복잡도가 낮은 D의 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 STTC의 성능 열화는 거의 없다는 것을 이미 보여 주었다. 하지만, 두 그림에서 볼 수 있듯이, A의 최적 복호 방식과 C의 안테나 별로 PRC한 후 복호하는 방식은 $d = 0.12$ 인 환경에 비해, FER 10^{-1} 에서 4-states 4PSK STTC는 약 3.5 dB, 3 dB의 이득이, 8-states 8PSK STTC는 약 4 dB, 3.5 dB의 이득이 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 이 두 기법은 STTC 성능의 열화를 보완할 뿐만 아니라, 부가의 PRC 이득을 얻을 수 있다는 것이다. 반면, B의 기법은 다중 경로에 의한 성능 열화를 보상하는 역할만 할 뿐, 그 이상의

이득은 얻지 못한다. D의 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. 즉, $d = 0.5$ 에서 SNR이 약 12 dB 이상인 구간에서 나타나는 정정할 수 없는 오류를 완벽하게 보완해 주고 있다. 즉, D의 기법은 지연확산이 적은 구간에는 적용해서는 안 되지만, 지연 확산이 커서 성능 열화가 많이 일어나는 다중 경로 환경에서는 적은 복잡도만으로 큰 이득을 얻을 수 있게 된다. 또한, $d=0.25$ 의 환경에서도 SNR이 약 18~19 dB 이상인 구간에서는 D의 기법의 성능이 다중 경로 페이딩 채널에서 성능 열화된 STTC보다 성능이 앞서기 시작한다는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 STTC가 얻을 수 있는 디버시티 이득과 부호화 이득을 그대로 유지하면서, CDMA 시스템의 장점인 다중 경로 페이딩 채널 환경에서의 성능 열화에 대한 면역성을 가진 STTC CDMA 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 STTC 시스템에 PN 부호의 확산, 역확산 과정을 추가하여 구성할 수 있다. 다중 경로 페이딩 채널 환경에서, 이 시스템은 PN 부호를 사용하여 다중 경로를 검출한 후, 컴바이닝하고 복호하는 방식을 사용하고 있다. STTC CDMA 시스템은 기존의 일반적인 STTC 시스템에 비해, PN부호를 이용한 확산, 역확산 과정이 추가되었다. 물론, 각각의 안테나는 동일한 PN 부호를 사용하고 있다. 결국, 수신단은 송신 안테나를 구분할 수는 없지만, PN 부호를 이용한 다중 경로의 구분이 가능하고, STTC 시스템에 비해 잡음에 대한 면역성이 증가하게 된다. 역확산 과정에서는 다중 경로를 검출하고 컴바이닝하는 과정이 추가되었다. 컴바이닝 기법으로는 STTC에 적합한 PRC(Principal Ratio Combining) 기법을 사용하고 있다. 컴바이닝과 복호 방법에 따라, 모든 신호들을 컴바이닝 없이 ML 복호하는 최적의 복호 방식과, 각각의 수신 안테나 별로 다중 경로 신호를 단순히 합한 후

복호하는 방식, 각각의 수신 안테나 별로 다중 경로 신호를 PRC한 후 복호하는 방식, 그리고, 모든 수신 신호들을 PRC한 후 복호하는 방식을 제안하였다. 이 방식들은 복잡도에 비례하여 좋은 성능을 보이며, 4가지 방식들 모두 다중 경로 환경에서 발생하는 정정할 수 없는 오류율(irreducible error rate)을 제거할 수 있다는 것도 보았다. 본 논문에서는 아주 간단한 구조의 STTC를 사용한 구조에 대한 모의 실험을 시행하였지만, 그 외의 좀더 복잡한 구조의 STTC를 사용한 시스템에 대한 연구를 통해, 복잡도와 성능을 고려한 최적의 시스템 구조에 대한 연구가 지속되어야 한다. 물론, 본 논문에서 제안한 시스템이 좋은 성능을 얻기 위해서는 역확산단의 동기화 알고리즘, 다중 경로 검출 알고리즘, 채널 추정 알고리즘 등의 기술 개발도 동반되어야 한다. 그리고, 더욱 성능이 우수한 STTC 부호를 찾는 연구도 지속되어야 할 필요성이 있다. 이러한 연구와 더불어, 터보 등화기(turbo equalizer), OFDM 등의 시스템과의 접목을 통한 효율적인 성능 향상 기법에 대한 연구도 지속되어야 한다.

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 Prin-

cial 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.

기 영 민(奇榮敏)



1977년 12월 27일 생
2000년 2월 : 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
2002년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2002년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정 재학중

관심분야 : MIMO, STTC, 다중접속기술, 채널 스케줄러, 무선네트워크

김 동 구(金東九)



1960년 5월 17일생
1983년 2월 : 한국항공대학교 통신공학과 (공학사)
1985년 : U.S.C. Dept. of Electrical Engineering (공학석사)
1992년 : U.S.C. Dept. of Electrical Engineering (공학박사)

1999년~현재: 연세대학교 공과대학 기계전자공학부 부교수

관심분야 : CDMA 이동통신시스템, 3G/4G 시스템, 오류정정부호