

고속 무선 통신을 위한 반복 복호 직렬 연쇄 시·공간 부호

정희원 김 옹 곤*, 구 본 진*, 양 하 영*, 강 창 언*, 홍 대 식*

Serially Concatenated Space-Time Code using Iterative Decoding for High Data Rate Wireless Communication

Woong Gon Kim*, Bon Jin Ku*, Ha Young Yang*, Chang Eon Kang*, Dae Sik Hong**

Regular Members

요 약

본 논문에서는 대역폭 효율적 고속전송이 가능한 직렬 연쇄 시·공간 부호(Serially Concatenated Space-Time Code; SCSTC)를 제안하고 성능을 분석한다. 제안된 직렬 연쇄 시·공간 부호는 내부의 시·공간 부호와 외부의 컨볼루션 부호를 인터리버를 사용하여 직렬로 연결한 구조이다. 제안된 부호는 시·공간 부호의 장점인 고속전송 특성을 유지하면서 단점으로 낮은 BER 성능을 향상시킨다.

제안된 시스템의 성능은 기존의 대역폭 효율적 트렐리스 부호 방식인 직렬 연쇄 트렐리스 부호 변조 (Serially Concatenated Trellis Coded Modulation; SCTCM) 및 병렬 연쇄 트렐리스 부호 변조(Turbo-Trellis Coded Modulation; Turbo-TCM)와 비교하였으며 이에 비해 향상된 BER 성능을 얻었다.

ABSTRACT

This paper suggests and analyzes the Serially Concatenated Space-Time Code(SCSTC) with the possibility of a efficient high-speed transmission in a band limited channel. The suggested code has a structure that uses the interleaver to connect the space-time code as a inner code and the convolutional code as a outer code serially. This code keeps the advantage of high-speed transmission and also has the high BER performance.

The performance of the suggested system is compared with the conventional bandwidth efficient trellis coded modulation, such as a Serially Concatenated Trellis Coded Modulation (SCTCM) and a Turbo-Trellis Coded Modulation(Turbo-TCM). The results show that the suggested system has a 2.8dB and 3dB better BER performance than SCTCM and Turbo-TCM respectively in case of the transmission rate 2b/s/Hz in fading channel.

I. 서 론

현대 무선 통신분야는 과거 저전송률의 데이터와 음성용 전송하는 단계에서 화상과 같은 고전송률과 고품질의 서비스 품질을 요구하는 단계로 발전하고 있다. 그러나 현실상 주파수 자원은 한정되어 있으

므로 이를 효율적으로 활용하여 우수한 품질로 다량의 정보전송을 가능하게 하는 시스템 설계에 대한 연구가 더욱 중요시되고 있다. 이를 위해 무선 신호가 전송되는 채널환경 및 주어진 대역자원에 따른 적절한 시스템 설계가 필요한데 중요시 고려되는 사항 중의 하나가 채널 부호화 방식이다. 또한 다수의 송, 수신안테나를 사용하는 것은 제한된 채

* 연세대학교 전자공학과

논문번호: 99478-1130, 접수일자: 1999년 11월 30일

** 이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야에 의하여 지원되었음.

널의 용량을 증가시키게 된다. 정보이론^[11]에서는 이러한 용량 증가에 관한 내용이 기술되어 있으며 최근 다중 전송 안테나에 적절한 코딩을 결합한 형태의 시·공간 부호는 기존 부호에 비하여 상당한 이득이 있는 것으로 알려져 있다^[1].

본 논문에서는 이러한 시·공간 부호를 응용하여 대역폭 효율적으로 고속전송이 가능한 SCSTC를 제안하고 그 성능을 분석한다. 제안된 직렬 연쇄 시·공간 부호는 시·공간 부호와 전복부서널 부호를 인터리버를 사용하여 직렬로 연결한 구조로써 시·공간의 장점인 고속전송의 특성을 유지하고 단점으로 지적되는 낮은 BER 성능을 향상시킴을 목적으로 한다. 제안된 부호의 성능은 반복 부호를 통해 얻을 수 있는 비트 오류확률 실험을 통해 보인다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 시·공간 부호를 구성하는 부호와 시스템을 모델링한다. 제 3 장에서는 2장에서 기술한 시·공간 부호의 다이버시티 특성과 직렬 연쇄 부호가 가지는 높은 에러 정정 능력을 이용하여 반복 부호가 가능한 SCSTC를 제안하고 그 구조와 반복 부호과정을 설명한다. 제 4 장에서는 제안된 SCSTC의 성능을 여러 가지 실험 변수를 사용하여 실험하고 대역폭 효율적인 부호로 알려져 있는 SCTCM 및 Turbo-TCM과의 성능을 비교 분석한다. 제 5 장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시·공간 부호

2.1 전송 시스템 모델

전송 다이버시티를 이용한 부호와 방식이 제일 처음 Wittneben에 의해 제안되었다^[1]. 이후 Tarokh는 트렐리스를 이용한 새로운 형태의 시·공간 부호를 제안하였으며 그림 1은 Tarokh의 시·공간 부호의 블록도이다^[1].

먼저 기지국은 n 개의 안테나를 가지고 있으며 이동국은 m 개의 안테나를 가지고 있다고 가정한다.

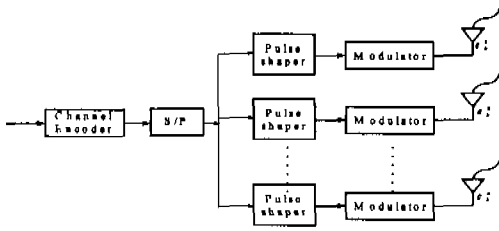


그림 1. 시·공간 부호 전송기의 블록도

각 시간 슬롯 t 에 변조기 i 의 출력은 신호 c_i 가 되며 i (단, $1 \leq i \leq n$)번째 송신 안테나를 통해 전송되어진다. n 개의 신호들은 다른 송신 안테나를 통해 동시에 전송되어지며 이 신호들은 같은 전송 주기 T 를 가진다.

수신기에서는 복조기가 각각의 수신안테나 j (단, $1 \leq j \leq m$)에서 수신된 신호를 기반으로 결정 통계량을 계산한다. 시간 t 에 안테나 j 에서 수신된 신호 d_j 는 다음과 같다.

$$d_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{i,j} c_i \sqrt{E_s} + n_j \quad (1)$$

이때 n_j 는 시간 t 에서 차원마다 분산 $N_0/2$ 를 가지는 평균 0의 복소 가우시안 랜덤 변수의 독립 샘플을 모델링한 것이다. 그리고 $\alpha_{i,j}$ 는 i 번째 송신 안테나와 j 번째 수신안테나 사이의 경로 이득이며 한 프레임이 전송되는 동안 일정하다고 가정한다.

2.2 시·공간 부호 구성

n 개의 송신안테나와 수신안테나로 구성된 무선 통신 시스템을 위한 시·공간 부호의 트렐리스 부호를 구성한다. 채널은 준 정적, 플랫 페이딩 채널이라고 가정한다. 각 시간 k 에서 부호기의 상태와 입력 비트들에 의해 천이 가지가 선택되어진다. 만약 이러한 천이 가지가 $a_k^1 a_k^2 \dots a_k^n$ 이라면 시간 k 에서 i 번째 전송안테나에서 전송하는 성상도 심볼들은 a_k^i ($i = 1, 2, \dots, n$)가 되며 이 모든 전송과정은 각 시간 마다 동시에 이루어진다.

다이버시티를 보장하는 디자인 규칙은 다음과 같다. 첫째, 같은 상태에서 출발하는 천이들은 두 번째 심볼 a_k^2 이 다르다. 둘째, 같은 상태로 도달하는 천이들은 첫 번째 심볼 a_k^1 이 다르다. 즉 위의 두 가지 조건을 만족시키면 최대 다이버시티가 보장된다는 것이다. 그림 2는 4-PSK와 8-PSK의 성상도를 보여주고 있다.

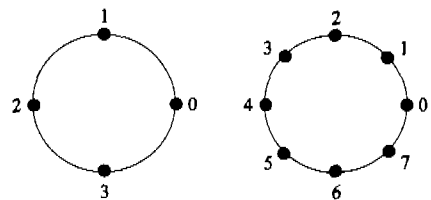


그림 2. 4-PSK와 8-PSK 성상도

그림 3과 그림 4는 Tarohk의 시·공간 부호 트래젝트들 중 상태수 16인 2-space-time code를 예로 들었다¹¹.

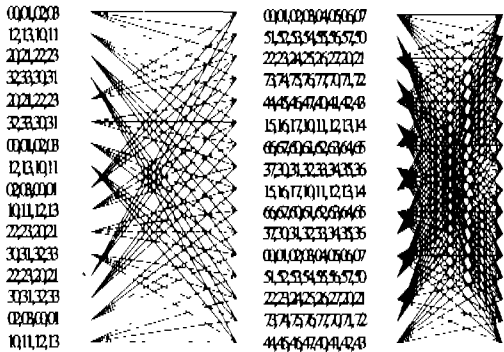


그림 3. 4-PSK 16-상태 그림 4. 8-PSK 16-상태

다음은 16-상태 4-PSK 트래젝트도와 16-상태 8-PSK 트래젝트도에 따른 시·공간 부호방정식이 다. 시간 k 때 첫 번째 전송 안테나에서의 전송 심볼은 x_1^k 이며 두 번째 전송 심볼은 x_2^k 이다.

$$\begin{aligned} (x_1^k, x_2^k) = & b_{k-2}(0,2) + a_{k-2}(2,0) \\ & + b_{k-1}(2,0) + a_{k-1}(1,2) \\ & + b_k(0,2) + a_k(0,1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (x_1^k, x_2^k) = & a_{k-2}(1,5) + a_{k-1}(5,1) \\ & + a_k(0,1) + b_{k-1}(2,2) \\ & + b_k(0,2) + d_{k-1}(4,4) + d_k(0,4) \end{aligned}$$

이때 덧셈은 Z_4 (modulo 4)이다.

III. 직렬 연쇄 시·공간 부호

본 장에서는 2장에서 언급한 시·공간 부호의 비트 오류 성능 향상을 위해 기존의 직렬 연쇄 컨볼루션 부호의 반복 복호 기법을 이용한 직렬 연쇄 시·공간 부호 (SCSTC)를 제안한다.

기존의 시·공간 부호는 안테나 다이버시티 특성을 가지고 있음에도 불구하고 비트 오류면에서는 높은 성능을 기대할 수 없는 단점이 있다. 이는 채널 부호의 열세에 따른 것이며 따라서 차세대 이동통신 시스템의 멀티미디어 서비스 환경에서 요구하는 높은 오류 정정 능력을 만족시키기 위해서는 새로운 부호가 필요하다. 최근 우수한 오류 정정 특성을 가지고 있는 부호들이 이러한 요구추세에 맞추어 등장하고 있는데, 이중 대표적인 부호로 SCSTC와 Turbo-Code를 들 수 있다. 이 두 부호는 모두

반복 복호를 통하여 높은 BER 성능을 얻는다^{13,4,5}. 그러나 SCSTC와 Turbo-Code는 대역폭 제한된 채널에서 높은 전송율을 기대하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 반복 복호가 가능하며 다이버시티 특성을 적용할 수 있는 방법을 모색하였고 그 결과 직렬 연쇄 시·공간 부호를 제안하게 되었다.

3.1 직렬 연쇄 시·공간 부호의 구조

SCSTC는 페이딩 채널 환경에서 대역폭 효율적이며 다이버시티 특성을 가지고 있는 시·공간 부호를 직렬 연쇄 부호의 내부 부호로 이용하고 외부 부호로는 컨볼루션 부호를 사용한다. 그러므로 SCSTC는 송신 안테나 다이버시티 특성을 가지고 있으며 트래젝트 부호와 같은 대역폭 효율성을 가진다. 그리고 페이딩 채널에서는 부호에 따른 성능 이득뿐만 아니라 다이버시티에 의한 성능 향상이 더 크기 때문에 제안된 SCSTC는 SCTCM이나 Turbo-TCM에 비하여 페이딩 채널에서 더 높은 에러 정정 능력을 기대할 수 있다.

그림 5는 제안한 SCSTC의 전체 송·수신 블록도를 보여주고 있다. SCSTC의 송신 시스템은 컨볼루션 부호기, 심볼 인터리버 그리고 시·공간부호기로 구성되어 있다. 수신 시스템은 시·공간 복호기, 심볼-디인터리버 그리고 컨볼루션 부호기로 구성되어 있다.

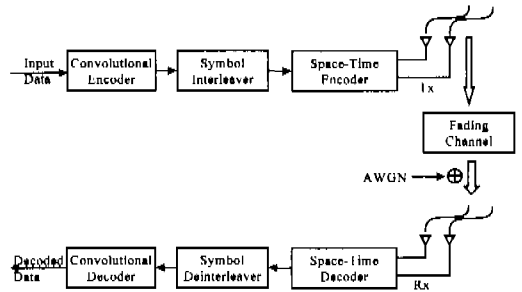


그림 5. 제안한 SCSTC의 전체 송·수신 블록도

3.2 직렬 연쇄 시·공간 부호의 복호 과정

본 절에서는 제안한 SCSTC의 반복 복호 방식에 관하여 설명한다. 반복 복호에 사용될 수 있는 알고리즘으로 본 논문에서는 최적의 오류 성능을 보이는 MAP을 복호 알고리즘으로 사용한다. 그림 6은 하나의 부호에 대한 MAP 복호 블록 모델을 보인 것이다. MAP 블록은 입력에서 두 개의 확률 분포 $P(c;I)$, $P(u;I)$ 를 받고, 출력으로 두 개의 확률 분포 $P(c;O)$, $P(u;O)$ 을 내보내는 4 포트 장치라고

첫 번째 복호기는 심볼-MAP을 사용하여 복호를 한다. 따라서 기존의 SCCC와는 달리 심볼-MAP 복호기 블록은 채널로부터 수신되는 심볼을 이용하여 트랜시스 가지에 대수 확률 밀도함수값을 매핑하게 된다. 심볼-MAP 복호기의 출력값 $P_u(u;O)$ 는 두 번째 복호기의 입력으로 사용되기 위해 디인터리빙된다.

시·공간부호의 입력 심볼은 컨볼루션 부호의 출력심볼이기 때문에, 그림 9와 같이 디인터리빙된 값은 비트-MAP의 윗단 입력 $P_{conv}(c;I)$ 으로 보내진다. 이때 비트-MAP의 아랫단 입력 $P_{conv}(u;I)$ 는 사용되지 않는다.

입력된 대수 확률 밀도값은 컨볼루션 부호에 의해 구성된 트랜리스의 가지에 가지 천이 확률로 할당되고 컨볼루션 부호의 입력 심볼에 대한 대수 확률 밀도함수값 $P_{conv}(u;O)$ 과 출력 심볼에 대한 대수 확률 밀도 함수값 $P_{conv}(c;O)$ 을 계산한다. 입력 심볼의 대수 확률 밀도함수값은 마지막 단계에서 정보비트에 대한 판정을 내리기 위해 사용되어진다.

재귀되어진 비트 정보들은 시·공간 부호 트랜리스에 할당된 초기 대수 확률 밀도 함수값에 더해진다. 이 과정으로 트랜리스의 가지에 대한 신뢰도를 높이는 역할을 하여 반복 복호시 오류 정정 능력 향상을 가져오게 된다. 인터리빙을 거친 대수 확률 밀도 함수 값은 컨볼루션 부호의 입력으로 사용되어지며 복호기의 출력은 입력값에 대한 결정과 재귀를 위해 사용되어진다.

IV. 실험 및 결과 분석

4.1 실험 환경

실험에서 사용한 환경변수와 기법은 표 1에 나타내었다.

컨볼루션 부호의 생성 다항식은 8진수 $G_1 = (g_{1,1}, \dots, g_{1,v})$ 과 $G_2 = (g_{2,1}, \dots, g_{2,v})$ 로 나타내며 이때 1/2부호의 경우 G_1/G_2 , 2/3부호의 경우 $G_1/G_2/G_3$ 의 형태로 표현하였다.

페이딩 채널은 2 장의 시·공간 부호에서 언급한 계수 설정 방법을 이용하였다.

제안된 SCSTC의 상태수 표기는 ST_Conv로 나타내며 ST는 시·공간 부호의 상태수를 나타내고 Conv는 컨볼루션 부호의 상태수를 나타낸다.

표 1. 실험 환경

환경 변수	실험 환경
채널 환경	준정적 플랫 레일리 페이딩
수신안테나수	1 / 2
송신안테나수	2
시뮬레이션 기법	Monte Carlo Simulation
시·공간 부호 변조방식	4-PSK, 8-PSK
시·공간 부호 상태수	4-PSK (4/8/16) 8-PSK (8/16)
컨볼루션 부호화율	4-PSK (1/2) 8-PSK (2/3)
컨볼루션 부호기 종류	NSC
컨볼루션 부호기 생성다항식	5/7, 15/17, 17/06/15, 27/75/73
인터리버 종류	Random
인터리버 크기	500/1000/5000/10000, 300/900/3000/9000

4.2 제안된 SCSTC의 성능 및 특성

본 절에서는 제안된 SCSTC의 구조적인 특성 및 반복 복호에서 나타나는 특징들과 인터리버의 크기에 따른 여러 가지 BER 특성들을 컴퓨터 모의실험을 통하여 살펴본다.

4.2.1 반복 횟수에 따른 성능 변화

그림 8은 크기 10000인 인터리버를 사용한 4-PSK 16_4 SCSTC의 BER 성능을 1회, 2회, 4회, 8회의 반복 복호를 하였을 때와 반복 복호를 하지

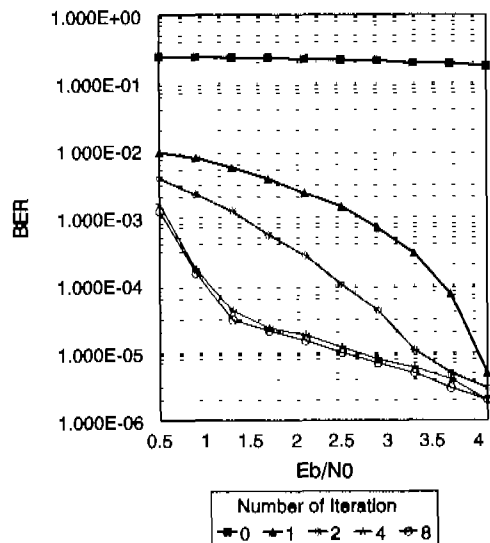


그림 8. 4-PSK 16_4 SCSTC의 반복 복호 회수에 따른 성능

않았을 때와 결과를 비교하여 보여준다. 결과 그래프를 통해 반복 복호를 하지 않았을 경우 이득이 없지만, 한 번의 반복 복호만으로도 많은 성능 향상을 얻을 수 있으며 BER 10^{-4} 일 때 한 번의 반복 복호에 비하여 4회의 반복 복호와는 약 3dB 정도의 차이가 난다. 또한 반복 복호 4회 이상이었을 때는 성능 차이가 거의 나지 않음을 알 수 있다. 이는 부호화 된 비트(정보)사이의 상관성이 증가하여 어느 정도 이상의 반복 후에는 더 이상 정보에 대한 신뢰도를 얻을 수 없기 때문이다. 실험을 통해 4회 정도의 반복 복호에서 수렴함을 알 수 있다.

4.2.2 수신안테나의 수에 따른 성능 변화

그림 9은 크기 5000인 인터리버를 사용한 8-PSK 16_4 SCSTC를 수신 안테나의 수에 따른 BER 결과이다 실험 결과에서 점선은 수신안테나 1개를 나타내고 실선은 수신안테나 2개를 나타낸다. 반복 복호 회수는 수신안테나 1개일 때와 2개일 때 각각에 대하여 2회 및 8회 반복 복호를 한 후의 결과이다. BER 10^{-4} 일 때 2회 반복 복호의 경우 수신안테나 2개일 때가 1개 일 때 보다 약 1.2dB 정도의 이득이 있다. 수신안테나가 1개일 경우 반복 복호 회수가 8일 때 성능의 증가가 더 이상 나타나지 않는다. 이것은 시·공간 부호가 가지는 경계 또는 송·수신안테나 수에 의한 용량 증가가 상한치에 도달하였음을 의미한다.

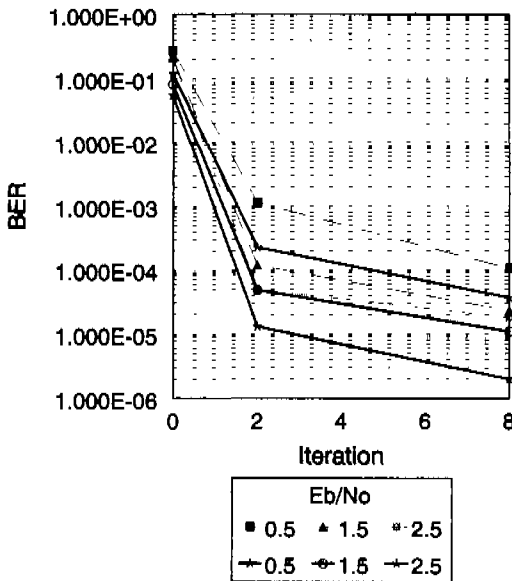


그림 9. 8-PSK 16_4 SCSTC의 수신안테나 수에 따른 성능

4.2.3 인터리버의 크기에 따른 성능 변화

그림 10은 인터리버의 길이의 변화에 따른 8-PSK 8_16 SCSTC의 성능을 비교한 결과이다.

인터리버의 크기가 500일 때와 1000일 때는 성능 향상이 거의 없거나 인터리버의 크기가 5000과 10000일 때는 확연한 성능 향상을 보인다. 이러한 결과는 인터리버 크기가 작을 때는 정보간의 상관성이 크게 되어 먼저 수렴하기 때문이다. 또한 BER = 10^{-4} 일 때 인터리버 크기 10000인 시스템의 성능이 5000일 때 보다 약 1.2dB 정도 좋다. 이러한 현상은 인터리버 크기가 작을 때는 앞단의 연집에러를 분산시키는 역할을 충분히 수행하지 못하기 때문에 뒷 단의 복호기에서 이의 영향을 계속 받게 되기 때문이다. 반면 인터리버 크기가 커지면 연집에러를 더 멀리 분산시키게 되어 복호시 판정 구간 이상의 인터리빙을 통해 서로간의 상관성을 감소시킬 수 있기 때문이다. 실험 결과를 통해 인터리버의 크기가 커지면 복호시의 성능이 좋아진다는 것을 알 수 있다.

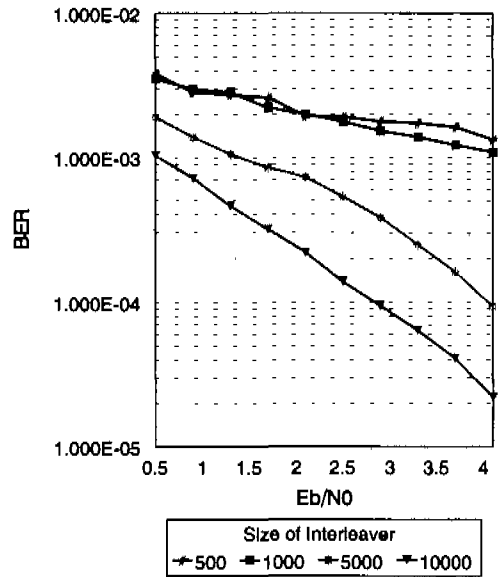


그림 10. 8-PSK 8_16 SCSTC의 인터리버 크기에 따른 성능

4.3 직렬 연쇄 트렐리스 부호변조(SCTCM)

및 병렬 연쇄 트렐리스 부호 변조

(Turbo-TCM) 방식과의 성능비교

본 절에서는 제한된 SCSTC를 SCTCM 및 Turbo-TCM과 성능을 비교할 한다. 비교를 위해 동일한 부호율을 기준으로 한다. 그래서 부호율이

2b/s/Hz일 때 16-QAM SCTCM과 8-PSK SCSTC를 비교하며 부호율이 1b/s/Hz일 때 8-PSK SCTCM과 4-PSK SCSTC를 비교한다.

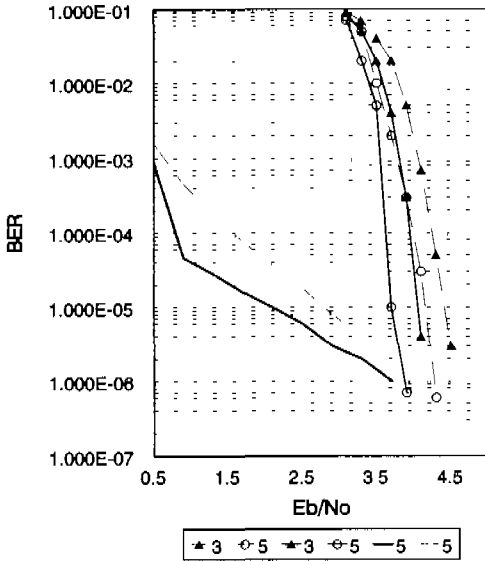


그림 11. 8-PSK SCTCM vs 4-PSK 16_8 SCSTC의 반복 부호 회수에 따른 성능

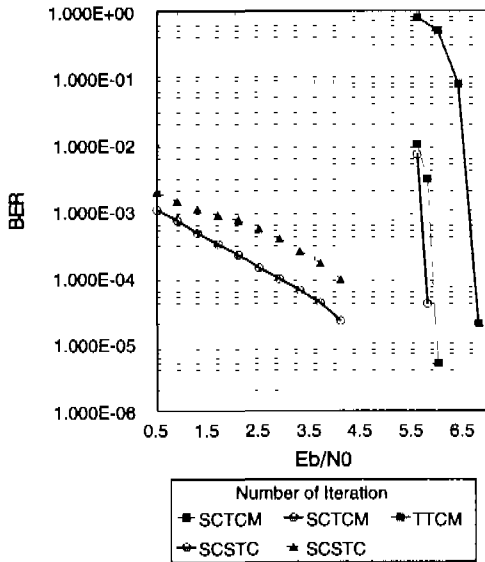


그림 12. 16-QAM SCTCM과 8-PSK Turbo-TCM vs 8-PSK 8_16 SCSTC의 반복 부호 회수에 따른 성능 비교

부호율이 1b/s/Hz일 때 Turbo-TCM의 경우 8-PSK Turbo-TCM과 8-PSK SCSTC를 비교 분석한다. 그림 11은 8-PSK SCTCM의 반복 부호 회수 3회와 5회 일 때의 성능을 보여주고 있으며 인터리

버 크기는 점선이 5000이며 실선이 10000이다. 그림 12은 16-QAM SCTCM과 8-PSK Turbo-TCM의 반복 부호에 따른 성능을 보여주고 있다. 이때 16-QAM SCTCM의 인터리버 크기는 점선이 5000이며 가는 실선이 10000이다^[21]. 8-PSK Turbo-TCM은 짧은 실선이며 반복 회수는 5회이다. 앞서 설명한 8-PSK SCSTC의 성능과 비교하면 1b/s/Hz의 경우 제안된 4-PSK SCSTC가 BER=10⁻⁴일 때 8-PSK SCTCM보다 약 1.5dB정도의 성능이득이 있으며 2b/s/Hz의 경우 제안된 8-PSK SCSTC가 16-QAM SCTCM에 비하여 약 3dB, 8-PSK Turbo-TCM에 비하여 약 4dB정도의 성능 이득이 있음을 알 수 있다. 이것은 SCSTC가 다이버시티 성질과 반복 부호에 따라 보* 이드오 동시에 가지기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 높은 부호율을 가지는 시·공간 부호의 다이버시티 특성을 유지하면서 동시에 높은 BER성능을 기대할 수 있는 시스템을 제안하고자 한다. 이를 위하여 반복 부호 과정을 적용시킨 직렬 연쇄 시·공간 부호(SCSTC)를 제안하였으며, 그 성능을 모의 실험을 통하여 검증해 보았다. 제안된 SCSTC는 내부 부호로 시·공간 부호를 사용함으로써 전송 다이버시티와 대역폭 이득을 가지게 된다. 또한 직렬 연쇄 부호의 형태를 유지하기 때문에 부호이득을 가지게 되어 페이딩 채널에 강한 특성을 나타낸다.

검증을 위하여 인터리버가 제안된 SCSTC의 성능에 미치는 영향을 살펴보았으며 SCSTC의 구성 부호기체인 시·공간 부호기와 컨볼루션 부호기의 상태수에 따른 성능 변화를 관찰하였고 수신안테나의 수에 따라 SCSTC의 성능 변화를 살펴보았다. 모의 실험을 통하여 제안된 SCSTC는 다음과 같은 특성을 가짐을 알 수 있다. 첫째, 제안된 SCSTC는 반복 부호 회수를 증가시킬수록 그 성능이 향상되고 반복 부호 회수가 4회 이상이면 수렴하게 된다. 둘째, 제안된 SCSTC는 SCTCM과 Turbo-TCM보다 BER 성능이 2b/s/Hz에서 각각 약 3dB, 약 4dB 더 좋다. 셋째, 수신안테나의 수가 증가할수록 성능이 향상된다. 그러므로 제안된 SCSTC는 대역폭이 제한된 고속 무선 통신에 적합하다 할 수 있겠다.

제안된 SCSTC의 응용분야로는 무선 이동 데이터 통신에 적용될 수 있을 것이다. 향후 연구과제로

