主題

차세대 무선통신에서 용량 증대를 위한 Space-Time 부호화 기법

한국과학기술원 김 영 주, 이 황 수

차 례

요 약
Ⅰ. 서 론
Ⅱ. SPACE-TIME 부호
Ⅲ. SPACE-TIME 부호의 후보군
Ⅳ. 결 론

요 약

1990년 초반부터 송신 다이버시티에 대한 연구가 있어왔다. 1990년 후반부터는 송수신 다이버시티에 대한 실용적인 결과가 부호 이론과 접목이 되면서 나오기 시작한다. 그 중에서 매우 유용한 결과인 Space-Time 부호에 대하여 다룬다. 본 논문에서는 직교 Space-Time block code, Layered Space-Time processing, 그리고 Space-Time trellis Coding 의 세가지로 분류하여 내용을 정리한다.

Ⅰ. 서 론

Beyond-IMT 이동통신 시스템에서는 현재 구현되어 있는 것보다, 특히 시스템의 다운링크에서, 훨씬 높은 용량이 요구될 것으로 예상이 된다[1]. 이를 가능하게 하는 여러 방법들 중 하나가 다수의 수신 안테나를 수신측에 장착하여 수신 다이버시티 혹은 어레이 프로세싱 기법으로 간섭을 최소화 하는 것이다. 간섭과 용량은 서로 역비례 관계에 있으므로[2], 이 방법은 시스템 용량을 최대화하게 된다. 그러나 일반적으로 다수의 안테나를 사용자의 단말기에 장착하는 것은 공간적인 제한이 있다. 이 문제를 해결하는 하나의 방법은 링크의 송신부에도 다수의 안테나를 장착하여 다수의 송수신 안테나 링크 즉 MIMO (multiple-input-multiple-output)의 기지국과 단말기의 링크를 만드는 것이다. MIMO채널에 대한 정보 이론의 해석에 의하면[3][4], MIMO채널의 고유한 평행관계에 의하여 상당한 용량 이득을 얻을 수 있고, 주어진 유저의 신호 대역내에서(즉, 심벌율 혹은 chip rate) 보다 많은 데이터를 압착해 넣을 수 있게 한다.

Space-Time 부호(STC)는 어레이 안테나 프로세싱 기법을 이용하여 MIMO 채널의 효과를 최대화하는 것으로, 무선통신 분야 산업체에서 최근 각광받는 기술이다. 이 새로운 혁신은 1990년대 초 스탠

포드의 Raleigh와 Cioffi 그리고 스위스의 ASCOM社의 Wittneben에 의해, 최근에는 1990년대 후반 Lucent Labs의 Foschini와 Gans [5][6] 그리고 AT&T Research Labs의 Tarokh와 그의 동료들에 의해[7] 개척되었다. Space-Time부호라는 '개념'은 무선 시스템에서 안테나 다이버시티의 중요성을 강조한 1980년 중반의 Winter의 논문에서[8] 확립되었다.

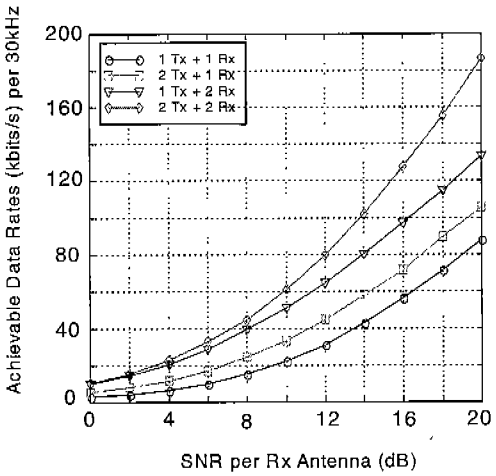

그림 1. Outage capacity of MIMO channel

송신기와 수신기 양쪽에 다수의 안테나를 사용하는 것은 STC 개념에서 필수 불가결하다. 왜냐하면 STC는 시간 차원 및 공간 차원을 모두 활용하여 페이딩을 효과적으로 경감시켜 전력 효율을 높이며, 병렬 전송을 이용하여 전송 데이터의 효율을 높여 향상된 대역 효율을 가져올 수 있다. 병렬 전송 패스는 '공간 모드(spatial modes)', '공간 채널(spatial channel)'이라고도 불리는데, 이는 다중 경로가 다수 발생하는scattering 환경에서 일어난다. 이러한 채널이 이론적으로 MIMO 시스템 용량에 미치는 영향은 [9]를 참조. 그림 1은 MIMO채널에서 수신 안테나의 신호 대 잡음 비에 따른 30KHz 대역폭에서 얻을 수 있는 데이터율을 보인다.

Ⅱ. SPACE-TIME 부호

Space-Time부호의 기본적인 원리는 그림 2에 기술한 바와 같이 정보 비트들의 스트림이 입력되면 이들로부터 송신 안테나 수에 맞게 벡터 출력들을 발생시켜 전송을 한다. 다른 안테나별로 동시에 전송되는 변조된 신호들을 Space-Time심벌(STS) 또는 Space-Time벡터 심벌(STVS)이라 한다. 변조된 심벌들은 복소수로 표현이 될 수 있으므로[10] Space-Time심벌은 복소수들의 벡터로 표시될 수 있고, 그 벡터의 크기는 송신 안테나의 수와 동일하다. FDMA/TDMA 시스템에서는 이들 동시에 발생하는 심벌들을 같은 반송파 주파수와 같은 심벌 파형을 이용하여 전송한다. CDMA 시스템에서도 역시 같은 확산 코드를(즉, Walsh 코드) 사용한다는 가정 하에 동일한 심벌 파형을 이용한다고 할 수 있다. 엄격히 말하면, 순수 Space-Time부호기는 MIMO 채널에 대한 정보가 없고, 수신기에서 복호를 할 때는 순시 채널의(instantaneous channel) 정보를 안다고 가정한다. 다시 말하면 non-blind모드 혹은 open mode라고 할 수 있다. 지금까지 발표된 논문 연구들을 보면, 편의상 non-dispersive채널, 즉 플랫 페이딩 채널을 가정하고 있다. 수신기는 다수의 송신 안테나에서 동시에 전송되는 Space-Time 심벌들을 각 수신 안테나마다 하나의 심벌 매취트 필터를(matched filter) 이용하여 검출한다. 이렇게 검출된 출력 신호들은 벡터 검파 통계로(vector detection statistic) 구성이 된다. 그림 3에서 보이는 바와 같이 각 수신 안테나에서 수신되는 벡터 검파 통계의 모든 원소들은 송신 안테나들에서 동시에 전송되는 다수의 심벌들의 중첩이다.

따라서 각 원소들은 AWGN이 없는 경우라면 QAM타입의 혼합된 성운의 모습으로 보인다. 이러한 성운의 형태는 Space-Time부호기의 구조, Space-Time부호의 변조 알파벳 그리고 순시 채널에 의존한다.

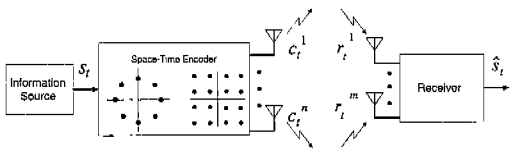

그림 2. Space-Time부호의 시스템 모델

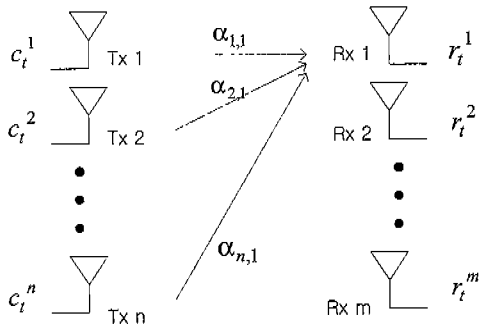

그림 3. MIMO 채널 모델

Ⅲ. SPACE-TIME부호의 후보군

1. STTC(Space-Time Trellis Code)

무선 채널 환경에서 다수의 송수신 안테나를 이용하여 시스템의 성능을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 1998년 AT\&T의 Vahid Tarokh, Nambi Seshadri, 그리고 A. R. Calderbank등에 의해 제안된 Space-Time 트렐리스 부호는 페이딩 채널에서 채널 부호화, 변조 기법, 그리고 다수의 송신 안테나를 통합하는 새로운 부호화 방식으로, 전송율을 높이거나 통신의 신뢰도를 높일 수 있다 - 혹은 전송율과 통신의 신뢰도를 높인다[7].

부호화 방법은 채널 부호기에서 데이터가 부호화되어 송신 안테나의 수n개의 심벌열들(streams)로 분배되고 n개의 송신 안테나를 이용하여 동시에 전송된다. [7]에서 공간-시간 트렐리스 부호는 다이버시티 이득, 전송율, 그리고 복호기의 去來(tradeoff) 관점에서 최적임을 증명하였다. 또한 페이딩이 느리고, 주파수 비선택적인(frequency nonselective) 채널에서 성능 기준(performance criteria)을 유도하였고, 제시된 설계 기준(design criteria)은 높은 데이터 전송율의 트렐리스 부호들을 설계할 때 이용된다. 공간-시간 트렐리스 부호는 송신 안테나의 수에 비례하는 다이버시티 이득 뿐만이 아니라 트렐리스 부호에서 얻어지는 부호화 이득을 가진다.

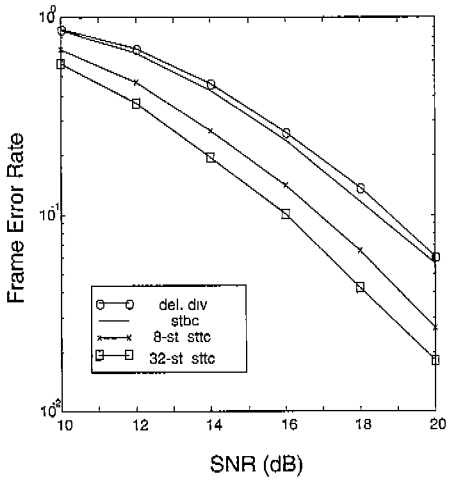

그림 4. MIMO 채널 모델

Space-Time 트렐리스 부호의 복호기는 Viterbi 알고리즘을 기반으로 하는 ML 수신기로 복잡도는 플랫 페이딩 채널에서 다음의 함수가 된다.

(1) 트렐리스에서 상태(state)들의 수
(2) 가능한 Space-Time심벌들의 세트의 수
(3) 한 상태에서 천이할 수 있는 가지(branch)의 수
(4) 수신 안테나의 수
(5) 채널의 도플러율

따라서 복호의 복잡도를 경감시키는 방법들이 제안되었다[11].

[7]에서는 전송율이 2 및 3 bits/symbol인 4-PSK 및 8-PSK 신호 세트에서 64상태 부호기를 이

용하여 2에서 3dB의 성능 개선을 보였다. 그림 4는 8-PSK 신호 세트에서 지연 다이버시티, Space-Time block code 그리고 상태 수가 8, 32인 Space-Time trellis code의 성능을 보인다.

한편 [7]의 방법은 경험적인 Space-Time부호 발생 방법을 제시하였고, 송신 안테나 수가 2개 이상인 경우에 대해서는 아무 언급이 없다. [18]은 길쌈 부호와 결합되는 수정된 Space-Time부호로 더 높은 상태 수 및 2개 이상의 송신 안테나에 쉽게 일반화가 가능한 방법을 제안했다. 이 기법은 잘 알려진 주어진 constraint길이에서 최적 이진 길쌈 부호를 이용하는 것이다. 길쌈 부호기의 출력을 QPSK 심벌들로 매핑하고, 그 결과를 다른 송신 안테나별로 디먹싱하는(demultiplexing) 것이다. 따라서 이 방법은 BLAST와 유사하다고 할 수 있다. 차이점은 BLAST는 코딩 이전에 디먹싱을 하는 반면, [18]에서 제안된 MC-STTC기법은 그 반대로 하는 것이다.

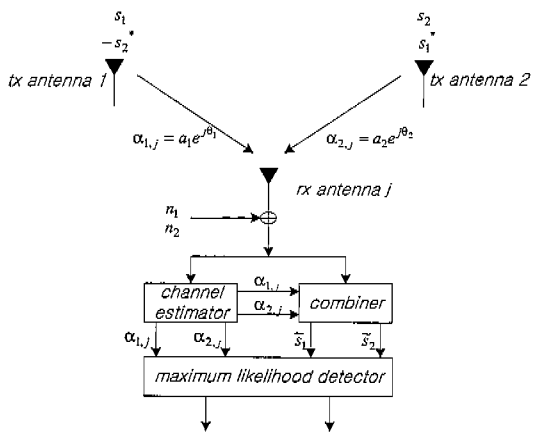

그림 5. 간단한 Space-Time block code

2. STBC(Space-Time Block Code)

공간-시간 부호의 또다른 중요한 분야로 공간-시간 블럭 부호가 있다. 1998년 Siavash M. Alamouti에 의해 처음으로 2개의 송신 안테나를 이용하는 송신 다이버시티 기법이 제안되었다[13]. 채널이 역시 완벽히 추정되었을 때 최대비결합을 이용하면, 송신 안테나 수에 수신 안테나 수를 곱한 값만큼의 다이버시티 이득을 온전히 얻을 수 있다. 공간-시간 트렐리스 부호에서 갖는 부호화 이득은 없고, 지연 다이버시티와 같은 성능을 보인다.

이 방법은 두 송신 안테나의 심벌 스트림들이 서로 직교성을 갖게 하는 것으로, 수신부에서는 복호는 매우 간단한 구조를 가지면서 다이버시티 이득을 얻는다. 다만 두 심벌의 시간 슬롯 동안 페이딩이 일정하다는 가정만이 요구된다. 대부분의 경우 그렇게 빠른 페이딩은 존재하기 어려우므로, 이 가정은 매우 타당하다. 그림 5는 간단한 STBC의 구조를 보인다.

한편 일반적인 coherent 복조의 경우는 송신부에서는 채널에 대해 모르고, 수신부에서는 채널 추정을 통해 한다고 가정을 한다. 그러나 어떤 경우에서는 채널 추정을 포기해야 할 경우가 발생한다. 송신기와 수신가 모두 채널을 모를 경우 보통 기존의 하나의 송신 안테나를 이용한 통신에서는 차분 변조(differential modulation) 기법을 이용하는데, 다수의 송신 안테나를 이용한 통신에서는 어떻게 해야 하는가에 대한 연구가 최근에 활발히 진행되었다.

Hochwald와 Marzetta에 제안한 방식은 송수신기 모두 랜덤 부호와 같이 지수 부호 및 지수 복호의 복잡도를 갖는다[14]. Hochwald등은 이를 개선하여 지수 복호를 하지만 다항 부호의 복잡도를 갖는 방식으로 다소 개선하였다[15].

Tarokh와 Jafarkhani가 제안한 방식은 송수신기가 모두 매우 간단한 구조로 다이버시티 이득을 온전히 얻을 수 있다[16]. 후에 Brian Hughes에 의해 제안된 것은 그룹 부호(group codes)에 기반한 흥미있는 방식이다[17]. [14] 및 [15]는 복잡도가 크며, Hughes의 방식은 간단한 구조를 가지지만, 첫 심벌을 수신기가 알고 있어야 한다. 반면에 [16]은 완벽한 차분 변조가 가능하고 송수신기가 간단하

다. 그림 6과 7은 [16]에서 제안하는 방식의 부호기 및 복호기의 블록도를 보인다.

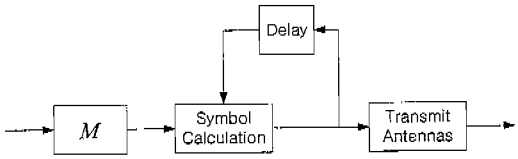

그림 6. 차분 송신 다이버시티의 부호기

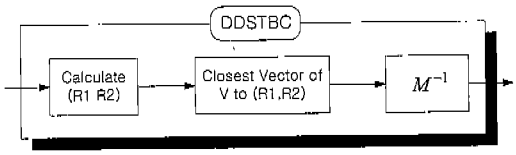

그림 7. 차분 송신 다이버시티의 복호기

3. Layered Space-Time Processing

이 기법은 BLAST라는 이름으로 Lucent의 벨 연구소에서 처음으로 소개가 되었다. Layered STC의 기본 개념은 다음과 같다. 전송하려는 정보 비트들은 개별적 스트림으로 디먹싱되고, 각각의 부호기로 입력된다. 부호기는 이진 길쌈 부호기를 쓰거나 아무 부호를 쓰지 안을 수도 있다. 부호기들의 출력들은 변조되고, 각각의 송신 안테나에서 같은 반송파 주파수/심벌 파형(TDMA) 혹은 같은 Walsh코드(CDMA) 를 이용하여 전송한다. 수신기에서는 공간적 빔성형(spatial beam-forming)/nulling (zero-forcing) 프로세스가 사용되어 개별 코드 스트림을 분리한다. 개별 코드 스트림들은 각각의 복호기로 들어간다. 복호기들의 출력들은 다시 multiplexing되고 원래의 정보 비트 스트림을 복원한다.

현재까지 오리지날한 BLAST에서 여러가지 변종들이 제안되어 왔다. 하나는, 약간의 ISI가 증가하는 대신 필요 신호의 신호 대 잡음 비를 증가시키기 위해 수신 안테나의 pre-processing을 수정하여 nulling대신에 MMSE 빔성형을 수행하게 하는 것이다.

MMSE 및 nulling방식은 둘 다 수신 안테나 어레이의 다이버시티 potential을 빔성형 프로세스에서 희생시키는 단점이 있다. 이 문제를 극복하기 위해 BLAST의 개발자들은 수신 프로세싱을 layering하는 방법을 제안했다. 즉, 더 약한 신호들을 검파했을 때 nulling하는 필요를 제거하기 위하여, 제일 강한 신호가 복호된 후(보통 비터비 알고리즘을 이용한다) 수신 안테나 신호에서 그 신호를 뺀다. 이 과정은 제일 약한 신호의 검파가 nulling을 더 이상 요구하지 않을 때까지 아래로 반복이 된다. 이 방법을 이용하면 다이버시티 효과가 최대가 된다. 이 layered 방식의 단점은 다른 모든 다중 사용자 검파 방식(MUD)과 마찬가지로, 잘못된 검파 결정들이 많이 발생할수록 성능을 저하시킨다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 다음 세대 이동 통신에서 사용될 가능성이 높은 MIMO채널에 적합한 Space-Time부호에 대하여 현재까지의 주요 기술들을 언급하였다. 다소 복잡도 올라가는 측면도 있으나, 다음 세대에는 하드웨어의 계산 능력이 지금의 수준과는 비교할 수 없게 향상이 될 것으로 예상이 되는 바 결코 실용화 단계가 그리 멀지 만은 않다고 할 수 있다. 세계적으로도 활발히 연구가 되고 있는 만큼 국내에서도 이 분야에서 다양하고 심도 있는 연구가 나오길 기대한다.

※참고문헌

[1] Book of Visions 2000 of WSI(Wireless Strategic Initiatives) 2000 (available from the WWRF Web server at:

http://www.wireless-world-research.org)

[2] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver and C. E. Wheatley, "On the capacity of a cellular CDMA system", *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, Vol. 40, No.2, May 1991.

[3] G. J. Foschini, Jr. and M. J. Gans, "On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun.*, 1997.

[4] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," AT&T-Bell Labs Internal Tech. Memo., June 1995.

[5] G. J. Foschini, Jr., "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas", AT&T-Bell Labs Tech. Journal, Vol., No. 2, pp. 41-59, Autumn 1996.

[6] G. D. Golden, G. J. Foschini, R. A. Valenzuela and P. W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture", *IEE Electronics Letters*, Vol. 35 No. 1, pp14-16, Jan. 1999.

[7] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communications: Performance criterion and code construction", *IEEE Trans. Inform.Theory*, vol. 44, pp.744-765, Mar. 1998.

[8] J. H. Winters., "On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment", *IEEE Journal on Sel. Areas in Commun.*, Vol. SAC-5, No. 5, June 1987.

[9] A. G. Burr, "Space-time coding in the third generation and beyond" Proceedings of IEE Colloquium on 'Capacity and Range Enhancement Techniques for the Third Generation Mobile Communications and Beyond' Feb. 11, 2000

[10] J. G. Proakis, "Digital Communications", 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 1989.

[11] V. Tarokh, and T. K. Y. Lo, "Principal ratio combining for fixed wireless applications when transmitter diversity is employed", IEEE Commun. Letters, vol. 2, No. 8, pp. 223-225, Aug. 1998.

[12] Y. J. Kim and H. S. Lee, "Generalized principal ratio combining for space-time codes in slowly fading channels", IEEE Communications Letters, vol. 4, No. 11, pp. 343-345, Nov. 2000.

[13] Siavash M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", IEEE J. Selected Areas Commun., vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, October 1998.

[14] B. M. Hochwald and T. L. Marzetta, "Unitary space-time modulation for multiple-antenna communications in Rayleigh flat fading", IEEE Trans. Inform. Theory, March 2000.

[15] B. M. Hochwald, T. L. Marzetta, T. J. Richardson, W. Sweldons and R. Urbanke, "Systematic design of unitary space-time constellation", IEEE Transaction Inform. Theory, 2000.
[16] V. Tarokh and H. Jafarkhani, "A differential detection scheme for transmit diversity", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, July 2000
[17] B. L. Hughes, "Differential Space-Time Modulation", IEEE Trans. Inform. Theory, 2000
[18] D. D. N. Bevan, R. Tanner, C. R. Ward, "Space-Time coding for capacity enhancement in future-generation wireless communications networks", IEE Collouium on Capacity and Range Enchancement Techniques for the Third Generation Mobile Communications and Beyond (Ref. No. 2000/003), 2000

김 영 주

1988년 고려대학교 전자전산공학과 학사
1994년 한국과학기술원 정보통신공학과 석사
1996년~1997년 동경공업대학 정보전자학과 연구원
2001년 한국과학기술원 전자전산학과 박사
1988년~현재 LG전자
Thesis(Ph.D.) : Generalized Suboptimum Decoding for space-Time Codes in Quasistatic Flat Fading Channels

이 황 수

1975년 서울대학교 전기공학과 학사
1978년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1997년~2000년 SK 텔레콤 연구원 원장
1983년~현재 한국과학기술원 교수
Thesis(Ph.D.) : A Performance Study of Speech Bandwidth Compression Systems.