

구조화 코딩(Structured Codes): 이론의 역사와 전망(History and Perspective)

이희관 (삼성종합기술원)

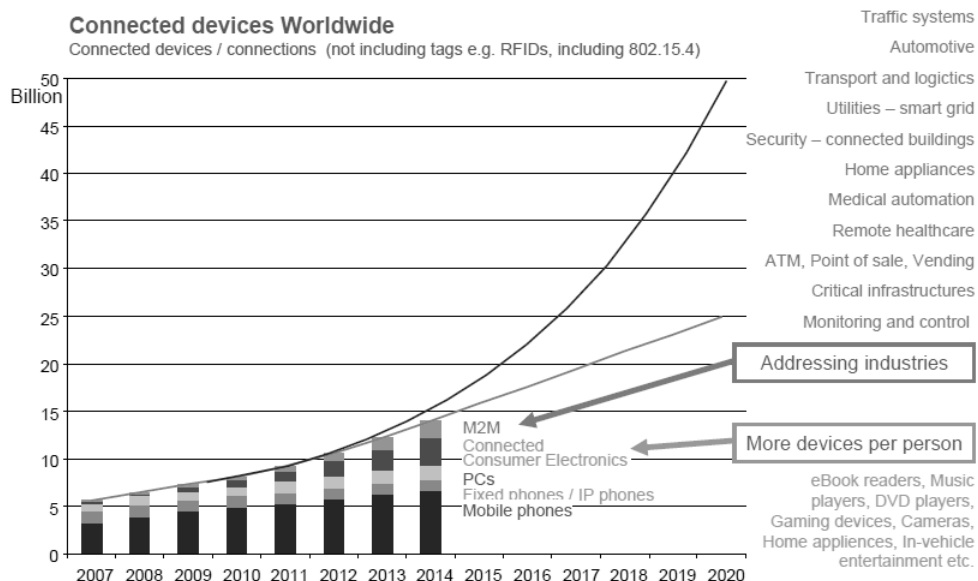
I. 서론

스마트 기기들의 급속한 보급과 함께 기존의 통신 사용자의 사용 패턴이 급속히 변화하고 데이터 량도 급증하고 있다. WWRF(Wireless World Research Forum)에 의하면 2020년에는 약 70억명의 사용자들이 약 7 조개의 무선 디바이스들을 사용할 것이라고 예측하고 있으며, CISCO의 예측에 의하면 세계의 모바일 통신 데이터 량은 매년 약 2배씩 증가하여, 2014년에는 2009년의 39배 이상이 될 것이라고 예상하고 있다. 또한 Portable Wi-Fi, 스마트 디바이스 등의 사용, 테더링 등, 사용자 중심의 데이터 트래픽의 변화는 무선 디바이스들의 증가 추세와 함께, 모바일 통신 데이터량의 폭발적인 증가 추세를 한층 더 심화 시킬 것이라고 예측된다^[1].

현재, 이와 같은 급속한 모바일 데이터 량의 증가를 해결

하기 위해, 많은 기술들이 도입되거나 시도 되고 있다. 그 중에서 대표적인 것이 다중 안테나를 사용하여 전송률을 향상시키는 다중 입출력(MIMO : Multiple Input Multiple Output) 기술이고, 그 외에도 소형 기지국을 이용하여 공간 자원을 재 사용하는 펌토 셀(Femto Cell) 기술, 기지국을 거치지 않는 단말간 직접 통신 등이 시도 되고 있다. 이러한 기술들은 모두 한정된 통신 자원을 효과적으로 사용하기 위한 방법들이라고 할 수 있다.

그러나 최근 연구의 흐름은 갈수록 부족해지는 통신 자원을 사용간에 나눠서 사용하기 보다는 모든 사용자들이 통신 자원을 공유하여 다 함께 사용하도록 하여 폭증하는 데이터를 처리 하도록 하게 하는 자원 공유형(Resource Sharing) 통신 기술로 집중되고 있다. 그 이유는 이러한 자원 공유형 통신은 통신 자원이 제한된 상황에서 단말의 수가 증가하고



〈그림 1〉 Ericsson 2010 Annual Report : 모바일 디바이스 증가 추세^[1]

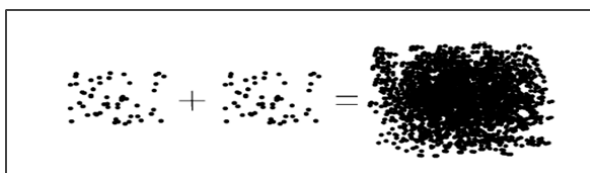
트래픽의 량이 증가하며 사용자 중심으로 통신 서비스 패턴이 변화하는 미래 통신 환경에 더욱 효과적일 수 있다고 예상되기 때문이다.

모든 사용자들이 자원을 공유하여 사용하는 통신에서 가장 중요한 문제는 다른 사용자로부터의 간섭을 처리하는 기술이다. 간섭을 제어/이용 하는 통신 기술로는 간섭 정렬 기술(Interference Alignment), 네트워크 코딩 기술(Network Coding), 동적인 자원 관리 기술(Dynamic Resource Management), 구조화된 코딩 기술(Structured Codes) 등이 있다. 이들 중에서 본 논문에서 소개할 기술은 구조화 코딩 기술(Structured Codes)로 간섭 원이 많은 통신 환경에서 성능 이득 가능성이 높은 기술로 여겨지고 있다.

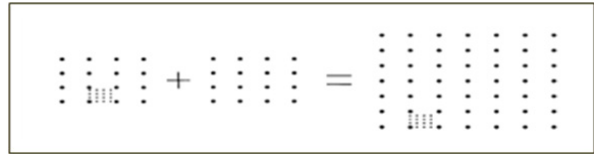
이제까지 통신에 사용되는 코드들은 자원 분할 방식을 전제로 하며 랜덤 코드 북(Random Codebook)을 기반으로 한다. 그 이유는 Shannon이 1948년 논문에서 포인트 투 포인트 채널(Point-to-Point Channel)의 용량(Capacity)을 상호 정보 척도(Mutual Information), $\max_{p(x)}(X;Y)$ 으로 정의하고 정의된 용량이 AWGN 채널(Additive White Gaussian Channel)에서 랜덤 코드 북으로 달성할 수 있음을 증명했기 때문이다^[2]. 그리고, 오랜 연구 끝에 터보 코드(Turbo Codes)와 LDPC Codes들이 포인트 투 포인트 채널에서 채널 용량에 근사함이 밝혀졌으며 실제로 산업체에서도 도입되어 널리 사용되고 있으나, <그림 2>에서 보여지듯, 독립적으로 사용되는 경우 최고의 성능을 가진 랜덤 코드 북 기반의 코드들은 여러 사용자가 동시에 통신을 하는 경우, 채널에서 합쳐지면 서로 뭉쳐서 간섭 파워가 크게 증가하게 되고, 수신 단에서는 원하는 신호의 복원이 어려워진다. 이와 달리 코드가 구조를 갖는 경우에 <그림 3>의 예에서 보듯, 간단한 송신 파워 조절만으로 동시에 수신되는 신호를 쉽게 분리할 수 있게 된다.

위의 간단한 예에서 볼 수 있듯, 간섭이 많은 통신 환경에서는 기존의 랜덤 코드 북 기반의 코드 보다 간섭을 제어/이용할 수 있는 구조를 가진 코드 북이 효과적으로 동작할 것이 예상된다. 이에 본 논문에서는 간섭제어에 유용한 기술로 구조화 코딩(Structured Codes)을 소개하고자 한다.

본 논문의 순서는 I장인 포인트 투 포인트(Point-to-Point Channel)에서의 구조화 코딩(Structured Codes)에서 구조화된 코드의 역사를 살펴보고, II장인, 간섭을 제어하기 위한 구조화 코딩(Structured Codes)에서는 구조화 코딩(Structured



<그림 2> Random 두 개가 동시에 존재하여 합쳐진 모습^[10]



<그림 3> Power차이가 있는 Structured Code들이 분리될 수 있는 모습^[10]

Codes)이 간섭을 제어하기 위해 어떻게 사용되기 시작했는지 Dirty Paper Coding과 연결하여 기술하고 III장에서는 최근 활발하게 연구가 진행되고 있는 다른 유저들에게서 오는 간섭을 제어 하는 기능을 가진 구조화 코딩(Structured Codes)을 소개하겠다.

II. Point-to-Point Channel에서의 Structured Codes

1948년 Shannon이 “A mathematical Theory of Communication”이라는 논문을 Bell Lab System Journal에 발표하여 정보량을 불확실성 함수(Entropy Function)로 정의하고 Point-to-Point AWGN에서의 채널 용량을 상호 정보 척도(Mutual Information)를 통해서 $1/2\log(1 + \text{SNR})$ 으로 구한 이후에 이러한 채널 용량을 달성하는 실재적인 코드가 존재할 것인가에 대한 많은 연구가 진행 되었다.

그 이후, 많은 연구자들은 이러한 채널 용량을 달성 하는 실재적 코드를 구현 하려고 많은 연구를 수행 하였다. 연구 초창기에 많은 연구자들의 관심을 끌었던 코드는 구조를 가진 코드들 이였다. 그 원인은 구조를 갖는 코드들이 스피어 패킹(Sphere packing)을 하기에 유리한 측면이 있었기 때문이다. 초창기 연구는 격자(Lattice)의 점들을 코드워드(codeword)로 생각하는 격자에 대한 연구 등이 하나의 큰 흐름으로 존재 하였고 대부분 수학자들이 이러한 흐름의 연구를 주도 하였다. 그 중에서 주목할 만한 결과는 1959년 E.S. Barnes과 G.E. Wall의 결과로, 그들은 무한한 길이의 (infinite length) 2^n 의 밀도가 높은 격자의 패킹(dense lattice packing)의 일반적인 구조를 만들었다. 그들의 코드 디자인은 1, 2, 4, 8, 16의 dimension에서는 가장 밀도가 높으나, 32 dimension 부터는 밀도가 점점 낮아지는 단점이 있었다. 1967년 J. Leech는 24 dimension에서 가장 밀도가 높은 격자 패킹 (ultra dense packing lattice)을 만들기도 하였다. 이렇듯 초창기의 코드 디자인(code design)의 한 흐름은 1950년대와 1960년대에 걸쳐서 격자에 기반한 밀도 높은 패킹(dense sphere packing)을 이루는 코드 디자인에 집중 되었다. 이는 Shannon이 높은 dimension의 space에서 채널 용량에 다가 가는 충분히 높은 밀도를 갖는 스피어 패킹(sphere packing)

이 존재한다는 결과를 기반으로 하였다. 그러나 이러한 초창기의 구조화 코딩(Structured Codes)들이 실제로 통신에서 사용되기 힘든 이유는 당시 Shannon이 제시한 채널 용량은 dimension이 충분히 큰 곳에서 이루어지지만 높은 dimension에서는 밀도가 높은 패킹(packing)을 갖는 격자 형태(lattice construction)를 찾기가 힘들고 격자 점(lattice point)들이 자체의 하나의 심볼로 코드와 심볼을 동시에 고려하는 코드 디자인을 만들기 어렵기 때문에, 다른 방식의 코드들이 등장하면서 서서히 잊혀져 가기 시작 했다.

그러던 중 1975년 R.D. Buda는 Shannon의 channel capacity theorem에서 제시한 Point-to-Point AWGN channel의 채널 용량을 격자 코드(lattice code)를 사용하여 근사할 수 있음을 증명 하였다^[5]. R. D. Buda는 n-dimensional hyper sphere에서 격자 코드(lattice code)를 사용할 때 error probability의 union bound를 구해서 exponent를 $1/2\log_2(1 + E_n)$ 의 형태임을 유도하고 E_n 이 무한대에 접근할 때 달성 가능한 용량(achievable rate)이 채널 용량에 접근함을 보였다. 여기서 E_n 은 energy per dimension이다. 이러한 증명을 위해서 Minkowski-Hlawka Theorem을 사용하여 error probability를 구하는 리만 적분(Riemann Integral)과 구의 이산적으로 분포된 격자점(discrete lattice hyper sphere)을 연결 하였다^[5]. 이 결과는 기존의 랜덤 코드로 채널 용량을 달성할 수 있다는 Shannon의 가설에 반하여 구조화 코딩(Structured codes)로도 Point-to-Point AWGN Channel의 용량을 달성할 수 있다는 가능성을 열어둔 결과로 의미가 크겠다고 하겠다. 그러나 이 결과는 SNR이 큰 영역에서는 Asymptotic하게 채널 용량에 근사하지만, SNR이 중간 이하인 영역에서는 Shannon bound에 심각하게 못 미치는 단점이 있는 결과로 일반적인 결과가 아니었다. 그래서 이러한 단점을 보완하기 위해 1993년, R.D. Buda는 Bounded region인 T-region을 Thick Shell로 가정하고 2개의 Hyper sphere들의 center가 하나의 격자 점으로 되지 않음을 가정하는 새로운 조건 하에서 같은 문제를 풀었다. 왜냐하면 코드 길이(code length)인 n이 무한대로 가면 코드워드들이 Spherical shell에 집중되기 때문에, 그는 격자의 boundary region을 T-region Thick shell로 정하고 그러한 thick shell 안에서 격자 코드 셋을 구성하고 거기에서 error probability를 구하여, 구해진 error probability의 exponent를 이용하여 달성 가능 용량(achievable rate)을 계산하였다. 이 결과 그는 Shannon bound에 factor 4까지 접근하는 optimal lattice code의 존재를 증명 하였다^[6].

1993년 T. Linder et al은 R. D. Buda의 새로운 증명 또한 오류가 있음을 지적하고 오류를 수정하였다^[7]. 그러나 증명의 오류 수정 이후, R. D. Buda의 증명은 n-dimension

안의 hyper sphere안에 있는 모든 격자 코드워드들에 적용되는 것이 아니라 충분히 큰 n에 대하여 n-dimension의 thin spherical shell안에 있는 격자 코드워드들에만 적용됨이 밝혀져서 일반적인 증명은 아님이 밝혀 졌다. 또한 그러한 경우 하에서의 thin spherical shell안에서만 격자 코드들은 이미 대부분의 규칙성을 잃어버려 랜덤 코드와 다른 성질을 가지게 되어 버린다.

1998년 R. Urbanke는 논문에서는 spherical shell이 아닌 n-dimensional Ball에서 minimum-distance decoding으로 채널 용량에 근사한 달성 가능 용량(achievable rate)을 얻을 수 있음을 증명 하였다^[8]. 그러나, 그들은 R. D. Buda의 결과와 같이 Bounding region을 thin spherical shell로 고정하고 Lattice decoding을 사용하여 Error probability를 구하면 $1/2\log_2(\text{SNR})$ 밖에 달성할 수 없음을 지적하였다.

U. Erez는 2004년 앞서 증명된 격자 코드(lattice code)들의 달성 가능 용량(achievable rate)들은 코드 길이가 무한대로 갈 때 thin spherical shell에서의 격자 코드(lattice code)의 error probability를 구한 것으로 이러한 현상은 n이 무한대로 갈 때 격자(lattice)가 가지고 있는 구조와 대칭성(symmetry)을 모두 잃어버리는 것을 지적하고 decoding시 수신된 신호와 가장 가까운 구안의 격자 점을 찾는 Maximum Likelihood Decoding을 사용하는 serach 경우, ML 자체가 제한이 없는 (unconstrained) serach를 기반하기에 디코딩 프로세스에서 대칭성(symmetry)을 유지하여 복잡도(complexity)를 줄여 주는 것을 지적 하였다^[9]. 그리고 이러한 격자 디코딩(lattice decoding)은 결국 용량을 $1/2\log_2(\text{SNR})$ 밖에 달성할 수 없으며 격자 디코딩(lattice decoding)으로 채널 용량을 달성 하려면 power constraint channel을 modulo lattice additive noise channel로 transform하고 nested lattice를 사용하여 SNR을 MMSE (Minimum Mean Square Error) estimation을 이용하여 증가시키는 개선된 형태의 격자 디코딩(Modified lattice decoding)을 수행하면 ML과 등가가 됨을 보였다^[9]. 그리고 그는 그러한 방법을 사용하여 $1/2\log(1 + \text{SNR})$ 의 채널 용량을 구조화 코딩을 통해서 달성할 수 있음을 보였다^[9].

이러한 연구의 역사를 통하여 결국 우리는 Point-to-Point AWGN channel에서 구조화 코딩(Structured codes)으로도 채널 용량을 달성할 수 있음을 알 수 있다.

Ⅲ. 간섭 제어를 위한 코딩 : DPC와 구조화 코딩(Structured Codes)과의 관계

1980년 Gelfand와 Pinsker는 “Coding for channel with

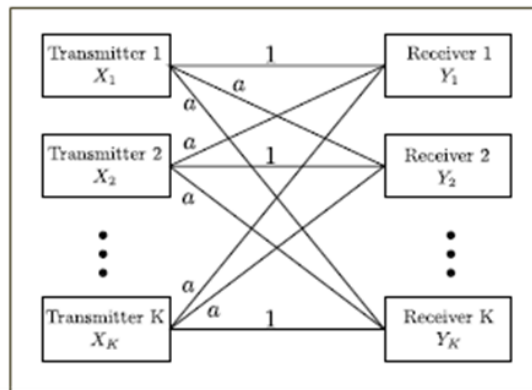
random parameters”란 논문에서 간섭 S가 송신 단에서 미리 알려져 있을 경우의 채널에서의 Capacity는 $C = I(U;Y) - I(U;S)$ 임을 증명 하였다. 여기서 U는 Auxiliary variable이다. 이는 간섭 원 S를 송신 단이 알 때의 간섭이 있는 채널의 용량을 계산 하였다.

M.Costa는 1983년도 “Writing on Dirty Paper”라는 논문을 통해 Gelfand-Pinsker의 이론적인 결과를 AWGN Channel에 적용하여 Auxiliary variable U를 Random Variable인 간섭 S와 X를 가지고 construct하는 방법을 구체적으로 만들었다. Dirty paper coding의 핵심은 MMSE 계수인 α 를 $P/(P + N)$ 으로 만들어서 Auxiliary variable인 U를 $U = X + \alpha S$ 로 구성하면 간섭 S가 있고 전송 단에서 간섭 S를 미리 알고 있는 상황에서 S를 미리 제거할 때 생기는 Power Loss없이 Point-to-Point channel에서 달성할 수 있는 만큼의 채널 용량을 달성할 수 있다는 것이다. 이러한 Dirty paper coding의 아이디어는 다중 입출력 (MIMO)과 연결되어 2001년 Caire et al “On Achievable Rates in a Multi-Antenna Gaussian Broadcast Channel” 논문에서 2명의 사용자가 있는 Multiple Input Multiple Output (MIMO) Broadcast Channel에서의 Achievable rate을 계산하는데 사용 되었으며, 이 결과는 후일 P.Viswanath, N.Jindal, 그리고, W.Yu 등에 의해 독립적으로 Multiple User와 Sum Rate등의 결과로 일반화되었다.

이러한 DPC의 아이디어를 사용하기 위해서는 랜덤 비닝(Random Binning)의 개념을 이용한 모듈로 오퍼레이션을 통해야 하고, 그것은 코드의 구조화를 통해서만 달성될 수 있다.

IV. 다른 유저들에게서 오는 간섭을 제어할 수 있는 구조화 코딩 (Structured Codes)

1장에서 본 포인트 투 포인트 채널(Point-to-point channel)에서의 채널 용량에 근접하는 구조화 코딩(Structured Codes)이나 2장의 간섭이 존재하는 포인트 투 포인트 채널(Point-to-point AWGN Channel)에서의 연구, 그리고 MIMO Broadcast Channel에서의 달성 가능 용량(Achievable rate)을 구하는데 사용되던 구조화 코딩(Structured Codes)은 2008년 Allerton Conference에 실린 Sridharan et al의 “A Layered Lattice Coding for a Class of Three User Gaussian Interference Channels”에서 최초로 다른 유저들이 동시에 존재하는 통신 상황에서 다른 유저들에 의한 간섭이 존재할 때 코드가 가진 구조를 이용하여 간섭을 제어 하는데 사용되었다. 다시 말하면 K-User Gaussian Interference Channel에서 <그림 4>와 같이 송신 단들이 동일한 격자(Lattice) Λ 에



<그림 4> Sridharan et al이 제시한 K-User Interference Channel

서 선택된 코드워드들을 사용하고 있을때, 만일 채널 매트릭스(Channel matrix)의 직접 채널 게인(direct link channel gain)이 1이고 간섭 채널 게인(cross link의 channel gain)이 α 로 모두 같다면 각 유저들의 수신 단에서 모든 간섭들은 $\alpha \Lambda$ 격자(Lattice)안으로 들어가게 되어 신호와 간섭을 분리할 수 있는 격자 얼라인먼트(Lattice Alignment)가 가능함을 보였다. 그 결과 간섭 채널 게인(cross link channel) 계수인 α 가 아주 작을 때와 아주 큰 경우에 Degree of Freedom (DoF)가 2-User interference Channel에서 가장 달성 가능 용량(achievable rate)이 큰 Han-Kobayashi 기법을 3-User 상황에 적용한 경우보다 우세함을 보여 주었다. Sridharan et al은 또한 같은 해 12월, “Capacity of symmetric k-user Gaussian very strong interference channels” 논문을 통해 Carleial의 Strong Interference Channel의 결과를 격자 코드(Lattice Code)에 적용하였다. Carleial의 Very Strong Channel에서의 결과는 간섭 신호가 매우 강한 채널의 경우, 원하는 메시지를 노이즈로 취급하고 간섭 신호를 먼저 디코드하면 간섭 신호의 메시지 용량에 큰 제한 없으며, 그 경우 각 노드들은 원하는 신호의 개별 채널 용량에 근사 하는 용량을 달성할 수 있다는 것이다. 상기 논문에서는 이러한 결과를 격자 코드에 적용하여 K-User Interference Channel에서 개별 노드가 독립적인 채널 용량에 근사 하는 용량을 달성할 수 있음을 보였다.

2009년 발표된 “Compute and Forward : Harnessing Interference through Structured Codes” 라는 논문에서 B. Nazer et al은 Multiple Access Channel에서도 구조화 코딩(Structured Codes)을 사용하면 랜덤코드를 사용할 때 달성할 수 있는 만큼의 채널 용량을 달성할 수 있음을 보였다.

또한, Broadcast Channel에서는, 앞서 언급한 대로 Dirty Paper Coding을 구조화 코딩(Structured Codes)으로 사용하여 MIMO BC의 달성 가능 용량(achievable rate)을 구했으며, Relay Channel의 경우, 2010년, Y. W. Song et al의 “List

decoding for nested lattices and applications to relay channels” 논문에서 기존 랜덤 코드 복으로 달성할 수 있는 Decode and Forward의 달성 가능 용량 (achievable Rate) 와 동일한 성능을 달성할 수 있음을 보였고, Compress and Forward Scheme의 경우, 2011년 Y. W. Song et al의 “Lattice Codes for Gaussian Relay Channel : Decode-and-Forward and Compress-and-Forward”에서 Wyner-Ziv Coding을 Relay단에 적용하여 랜덤 코드 복을 사용하는 경우와 동일한 성능을 가짐을 증명 하였다.

이로서 통신의 가장 대표적인 4가지 Channel인 Point-to-Point Channel, Broadcast Channel, Multiple Access Channel, Relay Channel에서는 구조화 코딩(Structured Codes)이 동일한 달성 가능 용량(achievable Rate)을 달성 함이 밝혀 졌으며, 앞서 언급한 바와 같이 Interference Channel의 경우, 최소 Degree of Freedom 차원에서 구조화 코딩(Structured Codes)이 랜덤 코드 사용 대비 성능이 우세 함이 예상된다.

그러면 이밖에 채널에서의 구조화 코딩(Structured Codes)의 성능은 어떠할까? 결론적으로 구조화 코딩(Structured Codes)은 위에서 언급한 4가지 기본 통신 채널 이외에, Two-way Channel등에서 랜덤 코드 복보다 성능이 우수한 경우가 많이 발생한다.

예를 들어 2-Way Relay Channel의 경우는, 2007년 K. Narayanan et al은 “Joint physical layer coding and network coding for bi-directional relaying”에서 네트워크 코딩 (Network Coding)이 발생할 수 있는 크로스 노드(Cross Node)가 Bi-directional data flow를 갖고 각 노드에서 격자 인코딩/디코딩(Lattice Encoding/Decoding)을 사용하면 교환 용량(exchange rate)은 $1/2 \log(1/2 + \text{SNR})$ 이 되며 각 각의 노드들이 $2P$ 의 전력으로 $n/2$ 의 채널만을 사용하는 경우 에 Joint Decoding Scheme을 사용 하면 $1/4 \log(1 + 2^* \text{SNR})$ 까지 달성할 수 있음을 보였다.

이는 구조화 코딩(Structured Codes)의 가장 큰 장점인 코드워드들 사이의 연산이 가능하다는 점이 사용된 결과이다. 구조화된 코드워드들은 코드워드들간의 덧셈이 가능하고, 또한 그 결과값의 디코딩이 가능하게 되어 같은 격자를 사용하는 여러 노드들이 데이터를 동시에 전송하는 경우에 발생하는 간섭을 제어하는 데에 매우 유용하며 Two-way Channel 과 같은, 같은 종류의 합쳐지는 상황에서도 또한 유용하다. 그러므로 구조화 코딩(Structured Codes)은 Physical Layer Network Coding과도 연결되어 많이 연구되고 있다.

또한 2011년에 발표된 W. Nam et al “Capacity of the Gaussian Two-Way Relay Channel to Within 1/2 Bit” 에 의하면 구조화 코딩(Structured Code)을 Nested Lattice 형

태로 사용하는 경우, Two-way Channel의 Outer Bound에 1/2 bit까지 근접하는 Achievable rate Region을 얻을 수 있다.

정리하면 구조화 코딩(Structured Codes)는 기본적인 통신 채널들에서 랜덤 코드 복과 같거나 나은 성능을 보이고 Two-way Channel과 같은 통신 채널들에서는 구조화 코딩 (Structured Codes)이 더 나은 성능을 보인다. 이는 구조화 코딩(Structured Codes)이 향후 간섭이 존재하는 상황에서 매우 유용하게 사용될 수 있음을 시사한다.

V. 맺음말

이제까지 Structured Codes의 기원과 연구 역사, 그리고 차세대 통신에서의 유용성 등을 살펴 보았다. 앞으로의 연구 주제들은 Ad-Hoc scenario에서 많이 발생할 수 있는 상황과 비슷한 General Topology에서의 Structured Codes의 전송 기법 연구와 구조화 코딩(Structured Codes)의 실제적인 코드 디자인(Practical Code Design) 등이 앞으로 남아 있는 연구 주제라고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] Ericsson Yearly Technical Report, 2010.
- [2] C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” Bell System Technical Journal, Vol.27, pp.379-423 and 623-656, July and Oct., 1948.
- [3] E. S. Barnes and G. E. Wall, “Some extreme forms defined in terms of Abelian groups”, J. Australian Math. Soc. 1 (1959), 47-63.
- [4] J. Leech, “Notes on sphere packings” Can. J. Math, 19 (1967), 251-267.
- [5] R. de Buda, “The upper error bound of a new near-optimal code” in IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.IT-21, pp.441-445, 1975.
- [6] R. de Buda, “Some optimal codes have structure” in IEEE J. Select. Areas Commun., Vol.7, pp.893-899, 1989.
- [7] T. Linder, C. Schlegel, and K. Zeger, “Corrected proof of de Buda’s theorem” in IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.39, pp.1735-1737, 1993.
- [8] R. Urbanke and B. Rimoldi, “Lattice codes can achieve capacity on the AWGN channel” in IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.44, pp.273-278, 1998.
- [9] U. Erez and R. Zamir, “Achieving $1/2 \log(1 + \text{SNR})$ on the AWGN channel with lattice encoding and decoding” in IEEE Trans. Inf. Theory, Vol.50, No.10, pp.2293-2314, 2004.

- [10] G. Bresler, A. Parekh and D. N. C. Tse, "The Approximate Capacity of the Many-to-One and One-to-Many Gaussian Interference Channels" in IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.56, No.9, Sep., 4566-4592, 2010.



이 희 관

1996년 3월 연세대학교 전파공학과 학사.
1998년 8월 University of Southern California (USC)
전자공학 석사.
2000년 8월 University of Southern California (USC)
수학과 Pure Mathematics 석사.
2003년 8월 University of Southern California (USC)
수학과 Pure Mathematics 박사 수료.
2005년 8월 University of Southern California (USC)
전자 공학과, 통신 전공 박사.
2006년~현재 삼성종합기술원 전문연구원으로 재직 중.
(관심분야) Coding Theory, Sequence Design,
Information Theory