

채널 부호화의 새로운 패러다임: 극부호화

김상호 (성균관대학교), 김영식 (삼성전자), 장지웅 (LG전자)

I. 서론

인류에게 있어 통신 문제는 석판에 글자를 새겨서 기록하고 전달하던 선사시대부터 이어져 내려온다. 이후 종이, 파피루스 등으로 대표되는 매체의 개발로 정보의 저장 및 이동의 자유도가 높아짐으로써 한단계 발전하였다. 이러한 미개한 수준의 통신에서 현대의 통신까지 발전되기까지는 두 가지 돌파구가 있었다. 첫째는 전기 혹은 전자파를 이용하여 신호를 전달할 수 있게 된 것이고, 또 하나는 통신 문제를 수학적 문제로 모델링하고 풀어낸 정보이론의 발견 및 적용으로 볼 수 있다.

1948년 Shannon은 최초로 수학적으로 정의되는 통신 채널에서 전송 가능한 최대의 데이터량을 정의하고 이를 채널 용량이라 명명하였다^[1]. 또한 Shannon은 랜덤부호이론을 이용하여 오류가 없이 채널 용량에 해당되는 전송률로 통신이 가능함을 보였다. Shannon으로부터 시작된 정보이론 분야에서는 70년대까지 통신 시스템의 상향 링크 통신에 해당되는 다중접속채널, 하향 링크통신에 해당되는 방송채널 등의 채널 용량 및 이를 달성하기 위한 채널 부호화기술들

에 대한 연구가 진행되어왔다. 하지만, 정보이론에서 제공하는 채널 부호화 기술들은 일반적으로 이론적 가능성만 제시될 뿐 길이에 따라 지수적으로 증가하는 복잡도 때문에 실용적으로 볼 수 없었다.

반면 부호이론 분야에서는 실용적으로 사용 가능한 오류정정부호에 대한 연구가 진행되었다. Hamming 부호, BCH 부호, Reed-Solomon 부호, 길쌈 부호 및 트렐리스 부호 등이 그것이다. Shannon의 약속 후에 40 여년이 지난 1993년에야 처음으로 이진입력 가우시안 채널에서 채널 용량에 근접하는 성능을 갖는 부호가 프랑스의 Berrou에 의해서 제시되는데 이것이 터보 부호이다^[2,3]. 최초로 실용적인 복잡도로 채널 한계 통신을 달성한 오류정정부호로 정보이론의 태동 이후 가장 중요한 성과중 하나로 꼽힌다. 이에 뒤를 이어 LDPC 부호 또한 채널 용량 부호로 재발견^[4,5] 된다. 터보 부호 및 LDPC 부호는 3G 이동통신, 디지털 위성방송, 차세대 무선랜 등에서 표준으로 채택이 되면서, 효율적인 무선 통신의 핵심적인 요소로 자리잡게 된다^[6,7].

터보 부호 및 LDPC 부호를 이용한 점대점 통신에서의 채널 용량의 달성은 더욱 다양한 채널

즉 다중 안테나 혹은 다중점 채널에서의 채널 용량 통신으로 관심을 돌리게 했다. 예를 들어, MIMO (multi-input multi-output) 채널에서는 고유 빔포밍(eigen beamforming)의 기술과 점대점 통신 채널 부호를 동시에 사용하면, 채널 용량 통신이 달성된다. 또한 방송 채널 등에서의 효율적인 통신을 위하여 정보이론에서 도입되었던, 중첩 부호화(superposition coding) 기술을 터보부호나 LDPC 부호와 적절한 변조 기술의 조합 형태로 실현하기도 하였다^[8~10]. 하지만, 일반적인 다중점 채널에서의 채널 용량 계산이나, 부호화 기술의 고안은 오랜 동안 미결 과제로 남겨져 왔다.

2008년 터키의 Arian은 극부호라는 개념을 제안함으로써 부호이론의 역사에 새로운 획을 긋는다^[11]. 이 극부호는 최초로 일반적인 채널에서 실용적인 복잡도를 가지면서 채널 용량 통신을 점근적으로 달성시키는 부호이다. 또한, 이 부호는 부호의 생성 자체가 채널용량 통신의 달성의 이론적 입증에 내포하게 된다. 뿐만 아니라, 극부호는 점대점 통신이외에 다중점 통신 혹은 분산 소스 부호와 등에도 적용될 수 있음이 입증됨으로써 다중점 통신에서의 다양한 미결 문제를 해결할 대안으로 떠오르고 있다.

본 고에서는 정보 및 부호이론 분야에서 새로

운 패러다임으로 등장한 극부호를 소개하고, 이 부호의 이론적 의미를 살펴보고, 연구 동향 및 향후 전망에 대하여 논하기로 한다.

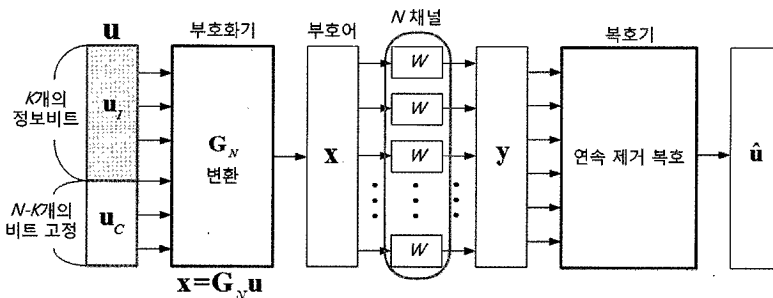
II. 채널 양극화 및 극부호화

2008년 Arian은 채널의 합성과 분리라는 기법을 통하여 주어진 N 개의 채널로부터 변환된 N 개의 채널을 생성하고, 변환 채널들이 극단적으로 좋거나, 극단적으로 나빠질 수 있음을 발견하였다. 극부호는 이러한 채널의 양극화 현상을 이용하여 채널 용량에 근접하는 통신을 실현하게 된다.

1. 채널의 합성

먼저 이진 이산 무기억 채널을 가정하자. 블록 크기를 M 이라 하여, 하나의 부호어를 전송하는데, M 번의 채널이 사용됨을 가정한다. 즉, 한 개의 부호어의 전송을 위하여 M 개의 독립적인 채널 W 가 존재한다. 그리고, 채널 합성 및 분리를 통하여 채널의 양극화 현상을 얻게 된다.

<그림 1>은 극부호화 및 복호과정의 블록도이다. 좌측의 벡터 u 는 길이 M 인 이진 벡터이다.



<그림 1> 극부호화와 복호 과정

이중 K 개의 비트가 정보 비트가 되고 나머지 비트들은 더미(dummy) 비트가 된다. 단, 채널 양극화의 설명단계에서는 정보 비트와 더미 비트를 구분할 필요가 없으니, 우선은 온전한 벡터 u 만을 고려하기로 하고, 이를 입력 벡터라 칭하자. 벡터 u 에 G_N 을 곱하여 부호어 x 를 생성한다. 부호화 혹은 채널 합성을 수행한다. 이 때, 벡터 u 를 정보벡터라고 보면 G_N 을 곱하는 과정은 부호율이 1인 선형 블록 부호화로 간주될 수 있다. 여기서, G_N 은 $G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 의 n 차 Kronecker 곱으로 예를 들어 $n=3$ 인 경우

$$G_8 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

와 같이 주어진다. 행렬 G_N 은 Reed-Muller 부호와 매우 밀접한 연관을 갖는다. 실제로 Reed-Muller 부호의 생성 행렬의 행벡터의 집합은 G_N 의 행벡터의 집합의 부분집합이 되기 때문이다. 이 과정에서 정방행렬인 G_N 부호율이 1인 선형블록부호이므로, 부호화 보다는 채널 합성이라는 용어를 사용한다.

2. 연속제거 복호와 채널의 분리

G_N 으로 부호화된 부호어 x 는 채널 W 를 N 번 사용해서 전송된다. 이 때 채널의 수신값은 y 로 표시한다. 수신기에서는 수신 벡터 y 를 이용하여 복호를 수행하고, 송신 정보 벡터 u 의 예측치인 \hat{u} 를 얻게 된다. 이 때, 정보 벡터 u 로부터 \hat{u} 까지

의 가상의 채널을 고려할 수 있게 된다. 극부호의 생성을 위한 채널 양극화 현상 얻기 위해서 연속 제거 복호 기법을 사용한다.

연속 제거 복호기는 u_1 부터 순차적으로 복호를 수행한다. 이미 복호된 비트는 완전하게 신뢰한다. 즉, u_i 의 복호에는 수신 벡터 y 와 이미 복호가 완료된 비트인 \hat{u}_1 부터 \hat{u}_{i-1} 의 정보를 지니고 복호를 수행하게 한다. 단, u_i 가 이미 수신기에 알려진 고정된 더미 비트에 속하는 경우에는 이미 알고 있는 비트로 복호하게 되고, 정보 비트인 경우에는

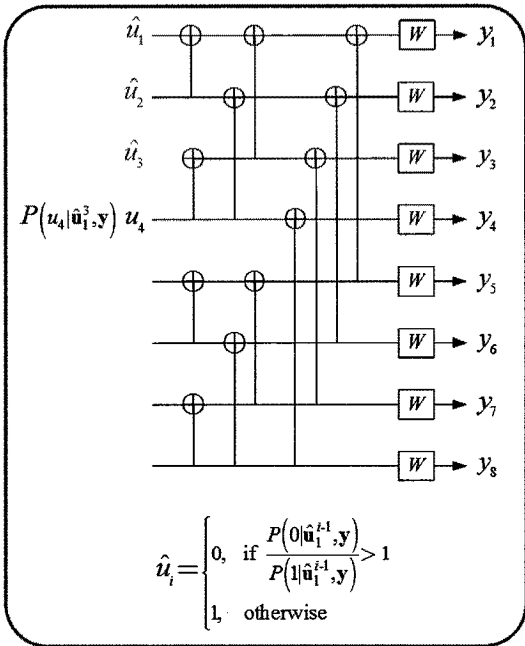
$$\hat{u}_i = \arg \max_d P(d | \hat{u}_1^{i-1}, y)$$

와 같이 MAP 규칙을 이용하여 복호를 수행한다. 단, 여기서 y_a^b 는 y_a 부터 y_b 까지의 변수를 포함하는 길이가 $b-a$ 인 벡터를 의미한다. 즉, y_1^N 은 y 에 대응된다.

<그림 2>는 $N=8$ 인 경우에 연속 제거 복호 과정을 보여준다. 예를 들어 u_4 를 복호하는 경우에는 $P(u_4=0 | \hat{u}_1^3, y)$ 와 $P(u_4=1 | \hat{u}_1^3, y)$ 를 비교하여 확률이 큰 쪽으로 판정을 내린다.

복호기에서는 송신기와 사전 약속에 의해서 더미 비트의 위치 및 값을 모두 알고 있어야 한다. 그런데 위의 연속 제거 복호는 u_4 를 복호함에 있어 u_5 가 더미 비트였다 하더라도, u_5 의 사전 정보를 이용하지 않기 때문에 엄밀한 의미의 최적의 복호가 되지는 못한다. 하지만, 고정 비트의 삽입이라는 방법을 이용하여 채널 양극화 현상을 얻을 수 있고, 극부호를 생성할 수 있게 된다. 이 연속 제거 복호 과정은 $O(\log M)$ 의 계산 복잡도를 갖기 때문에 충분히 실용적이라 할 수 있다.

이 복호과정을 살펴보면, u_i 의 복호를 위한 가



〈그림 2〉 연속제거 복호

상 채널은 다음과 같이 정의될 것이다.

$$W_N^{(i)} = W(y, \hat{u}_1^{i-1} | u_i)$$

이를 연속 제거 복호를 통한 채널의 분리라 하고, 각 가상 채널을 변환 부채널이라 부르기로 하자.

3. 채널 양극화와 극부호화

먼저 채널 양극화 현상을 관찰하기 위해서, Genie-aided 연속제거 복호를 고려한다. 이 경우, 입력 비트 u_i 에 대한 변환 부채널은

$$W_N^{(i)} = W(y, u_1^{i-1} | u_i)$$

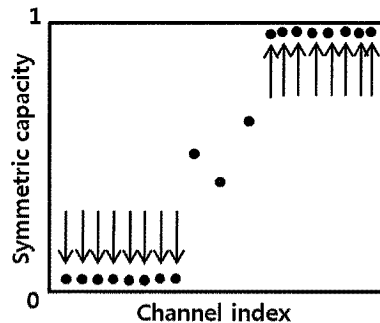
이 된다. 즉, 이미 복호가 된 비트는 모두 완전하

게 알고 있다는 가정 하에 복호를 시도한다.

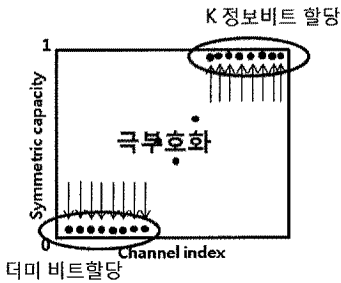
Genie-aided 연속 제거 복호 기법을 통하여 각 비트당 복호를 수행하게되면 채널 양극화라고 하는 독특한 현상을 관찰할 수 있다. u_i 에서 \hat{u}_i 로의 각각의 채널은 극단적으로 좋거나, 극단적으로 상태가 나빠진다. 〈그림 3〉은 그러한 채널 양극화 현상을 도시한 것이다. 가로축은 변환 부채널의 인덱스이며, 세로 축은 비트 오류로부터 유도되는 각 변환 부채널의 채널 용량을 의미한다. 일반적으로 먼저 복호가 수행되는 비트들의 채널 용량이 낮은쪽으로 편중되며, 후에 복호되는 비트들은 완전한 채널로 수렴한다. 이러한 경향은 연속 제거 복호기 기법에서 나중 비트로 갈수록 많은 정보를 가지고 복호를 시도한다는 사실로부터 유추될 수 있다.

N 즉, 부호어의 길이가 길어질수록 채널의 양극화는 심화되어 종국에는 K 개의 용량이 1에 근접하는 좋은 채널과 $N-K$ 개의 용량 0인 채널만 남게 된다. 그리고, 주어진 채널 상황에 대해서는 채널의 양극화는 고정적이다.

극부호화는 이렇게 양극화된 채널 중 좋은 채널만을 사용한다는 단순한 아이디어에서 시작된다. 〈그림 4〉는 남은 극부호화 과정을 보여준다. 이미 채널 합성 및 복호화 부분이 고정되었으



〈그림 3〉 채널 양극화



〈그림 4〉 극부호화

로, 남은 것은 실제 정보 비트를 어떻게 선택하느냐 일 것이다. 충분히 큰 N 에 대하여 채널 양극화 현상을 관찰할 때, 전체 채널 수 N 에 대한 좋은 채널의 비율은 채널 w 의 채널용량 C 에 의해서 결정된다. 즉 좋은 채널의 수는 $N \cdot C$ 에 근접하게 된다. 부호화기에서는 좋은 채널만을 골라서 정보비트를 할당하고, 나머지는 고정된 비트를 할당한다. 이 때, 이 더미비트는 모두 0으로 결정되어도 일반성을 잃지 않는다. 그러면, 좋은 변환 부채널을 겪는 비트들은 수신기에서 매우 낮은 오류로 복호가 가능할 것이고, 정보비트의 수는 좋은 채널의 수인 NC 개정도 이므로, 채널 용량에 근접하는 통신이 가능해진다.

이러한 극부호화의 구조 및 채널 용량 통신 특징은 일반적인 이진 입력 채널에 대해서 성립하는 것이고, 부호의 구조 자체가 채널용량을 달성함을 함축하고 있다.

마지막으로 극부호화에서의 문제점은 좋은 채널을 부호기 및 복호기에서 어떻게 공통적으로 선택할 수 있는냐는 점이다. 실제 채널이 시간에 따라 변하는 경우 좋은 변환 부채널의 위치가 바뀔 터인데, 부호기 및 복호기는 각자 그 정보를 알아낼 수 있어야 하기 때문이다.

Arikan은 이 문제에 대해 이진 소실 채널에서 낮은 복잡도로 좋은 채널의 수와 위치를 찾아내는 알고리즘을 제시하였다. 또한, 이진 대칭채널

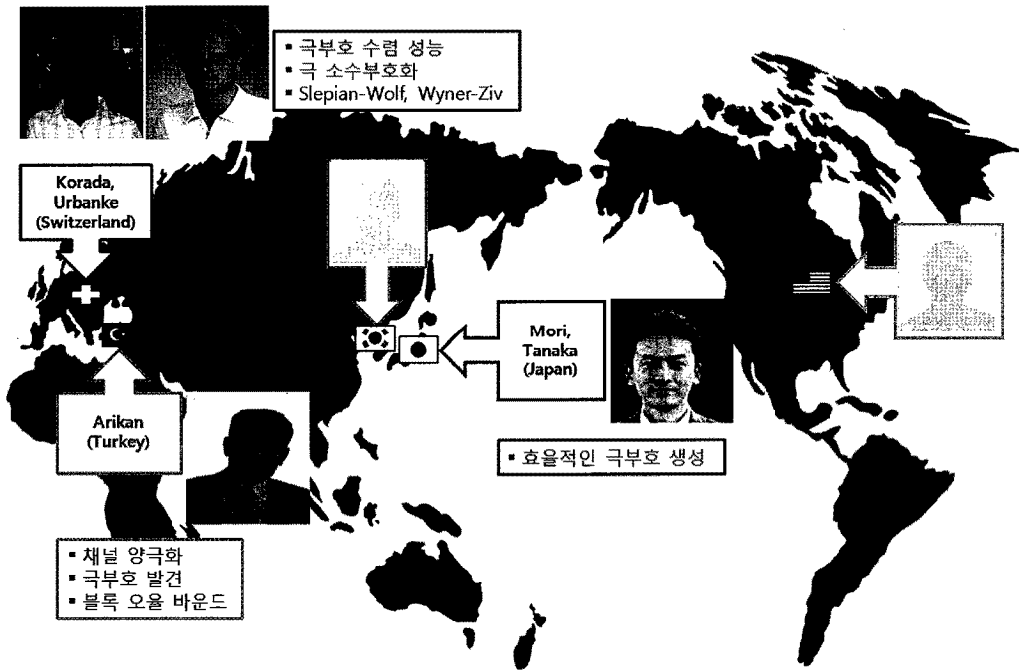
혹은 가우시안 채널에서도 같은 알고리즘이 효과적인 것을 보였다.

III. 극부호화의 연구 동향 및 전망

본 절에서는 극 부호화의 연구 동향을 살펴보고, 해결되어야 하는 문제점들을 진단한다. 극부호는 불과 2008년에 최초로 제안된 것으로 세계적으로 연구의 초기 단계에 불과하나, 극부호가 같은 이론적 중요성 및 발전 가능성 때문에 많은 연구자들의 관심을 모으고 있는 실정이다. 하지만, 현재까지 의미있는 결과를 제시한 연구 그룹은 대략 3개 정도로 압축될 수 있다.

먼저 2006년 터키의 Arikan은 채널 결합 및 분리의 개념을 최초로 도입하여 순차적 복호(sequential)의 한계 전송률인 cutoff 율을 증가시킬 수 있음을 보였다^[12]. 이 연구의 연장선상에서 2008년 ISIT에서 세계 최초로 채널 양극화(channel polarization) 및 극부호의 개념을 소개하였다^[11]. Arikan 및 Teletar는 이후에 채널 양극화 율에 관한 결과를 발표하였고^[13], 다양한 복호 기법을 이용한 극부호의 성능 분석 그리고, 극부호 생성의 기반이 되는 Reed-Muller 부호 기술에 대한 조사를 통하여 기존 연구 결과와의 관련을 재조명하였다^[14]. Teletar를 포함하는 Arikan 그룹은 해당 분야 연구의 가장 선도적인 지위를 점유하고 있다.

Arikan 그룹에 이어 가장 활발하게 연구를 진행하고 있는 그룹은 EPFL의 Urbanke 그룹이다. Urbanke는 LDPC 부호 분야에서 세계 최고라 할 수 있는 석학으로 새로이 시작된 극부호 분야에서도 발 빠른 연구 활동을 보이고 있다. Urbanke, Korada를 중심으로 한 스위스 EPFL



〈그림 5〉 극부호화 연구 동향

그룹에서는 $E_C[G]$ 가 생성행렬 G 의 함수일 때, 극부호의 블록 오율이 $O(2^{-N^{e(G)}})$ 의 속도로 감소할 수 있음을 보였다^[15]. 블록 오율의 길이에 따른 감소 속도는 부호의 적용 관점에서 매우 중요한 이슈로, 빠른 수렴 속도는 부호 자체의 상용화 가능성과 밀접한 관계를 갖는다. 또한 Korada-Urbanke 그룹은 극부호 기술이 소스 부호화에도 사용될 수 있음을 보였으며^[16], 근래에는 이것이 다중점 소스 부호화 이론인 Slepian-Wolf 및 Wyner-Ziv 문제에 적용됨이 확인되었다^[17]. 또한, 다중 사용자 MIMO 시스템의 DPC (dirty paper coding) 문제에 해당되는 Galfend-Pinsker 문제에도 적용 가능성을 확인하였다. Urbanke, Korada 그룹은 해당 분야에서 가장 왕성한 연구 활동을 펼치는 연구 그룹이다.

일본의 교토 대학의 Mori와 Tanaka는 극부

호의 효과적인 생성 방법 즉, 좋은 채널을 선택하는 방법에 대한 연구를 진행하고 있다. Arikan의 기존 논문에서 제시된 생성 방법이 이진 소실 채널에 대한 것이었고 다항식 시간 복잡도 (polynomial complexity)를 갖는 것에 비해 더 낮은 복잡도인 $O(N)$ 의 복잡도를 갖는 간단한 생성법을 제시하였다^[18,19]. 이 새로운 생성법은 밀도 진화 (density evolution) 기법을 이용하였으며, 이진 입력 (binary input) 이산 무기억 채널 (discrete memoryless channel) 뿐만 아니라, 일반적인 이진 입력 무기억 채널을 위한 극부호를 생성하였다^[19].

이외에도 세계적으로 많은 연구자들이 극부호 분야에 관심을 갖고 연구를 시작하고 있다. 첫 번째는 극부호가 채널 합성 및 분리라는 간단한 기법을 통해서 정확하게 채널이 허용하는 정도의 수 혹은 비율에 해당하는 완전한 채널을 만들어

내었다는 점에서 이론적으로 대단히 큰 의미를 갖기 때문이다. 또 하나는 이 기술이 다중점 통신 문제의 근본적인 해법이 될 수 있는 실마리를 발견했기 때문이다. 이미, 극부호화 다중 접속 채널에 유효하고, 효과적인 Slepian-Wolf 분산 소스 부호화에 사용될 수 있음이 보여졌다. 극부호화가 갖는 일반성은 더 다양한 채널 환경에서 최적의 채널 부호화를 제공할 수도 있을 것이다. 앞으로 릴레이 채널, 간섭채널 및 방송 채널 문제에 적용이 시도될 것으로 보인다.

실용적인 관점에서 볼 때, 점대점 통신에서 극부호가 이미 나와 있는 오류정정부호를 대체할 것으로 보이지는 않는다. 이미 채널 용량을 달성하는 터보 부호 LDPC 부호 기술이 매우 성숙되어 있기 때문이다. 하지만, 극부호 연구는 다중점 통신을 위한 근본적인 해결책을 제시할 가능성이 있다.

실용적인 관점에서 극부호가 풀어야될 문제도 있다. 물론 N 이 커짐에 따라서 극부호통신이 채널 용량에 근접하는 것은 입증되었지만, 얼마나 빠르게 근사하는 지는 실증되지 않았다. 실용적인 길이에서 그리고, 가장 중요한 가우시안 채널 하에서 채널 용량에 근접하는 성능의 예가 아직 보여지지 않았다. 그러므로, 극부호의 실용화에 관해서 앞으로 많은 문제가 던져지고, 해결하려는 시도가 행해질 것이다.

IV. 결 론

채널 부호화 이론에 새로운 패러다임으로 떠오른 극부호 기술을 소개하였다. 극부호는 채널 합성 및 분리 기술을 통하여 채널 양극화를 만들어 내고, 양극화된 채널 중 좋은 채널만을 사용

하는 것을 전제로 생성된다.

극부호는 최초의 증명 가능한 일반적인 채널에서의 채널 용량 통신을 낮은 복잡도로 가능하게 하는 부호 기술이라는 점에서 큰 의미를 갖는다.

이에 따라 많은 연구자들이 극부호에 대한 관심을 갖고 해당 분야에 대한 다양한 연구를 진행하고 있다. 이미 밝혀진 것처럼 극부호는 네트워크 정보이론의 대부분의 문제에 적용이 가능한 특징을 가지고 있다. 그러므로 앞으로 연구의 범위가 기본적인 점대점 통신 시스템이나, 소스 부호화 뿐 만 아니라, 근래에 각광을 받고 있는 릴레이 기반 협력 통신 기술 혹은 간섭 채널 기술까지도 확장될 것으로 예상되며, 향후 3-5년 간 해당 분야 연구가 폭발적으로 증가할 것으로 보여진다. 특히 곧 실용적인 극부호에 대한 연구가 진행될 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] C.E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," Bell System Technical Journal, Vol.27, pp.379-423, 623-656, July, October, 1948.
- [2] C. Berrou, A. Glavieux and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes," in Proc. IEEE Int. Conf. Commun., Vol.2, pp.1064-1070, May, 1993.
- [3] D. Divsalar and F. Pollara, "On the Design of Turbo Codes," TDA Progress Report 42-123, Jet Propulsion

- Laboratory, Pasadena, California, pp.99-121, November, 15, 1995.
- [4] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IRE Trans. Inf. Theory*, Vol.8, pp.21-28, 1962.
- [5] D. J. C. MacKay and R. N. Neal, "Near Shannon limit performance of low-density parity-check codes," *Electron. Lett.*, Vol.33, pp.457-458, Mar., 1997.
- [6] 3G TS 22.100 3.5.0, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects UMTS phase 1 Release 99 (3G TS 22.100 version 3.5.0)", Dec., 1999.
- [7] ETSI EN 301958 V1.1.1, "Digital video broadcasting (DVB); Interaction channel for digital terrestrial television (RCT) incorporating multiple access OFDM", Mar., 2002.
- [8] I. Krikidis, "Analysis and Optimization issues for superposition modulation in cooperative networks," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, Vol.58, No.9, pp.4837-4847, Nov., 2009.
- [9] H. T. Do and S.-Y. Chung, "Linear beamforming and superposition coding with common information for the gaussian MIMO broadcast channel," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.57, No.8, pp.2484-2494, Aug., 2009.
- [10] D. Kim, F. Khan, C. V. Rensburg, Z. Pi and S. Yoon, "Superposition of broadcast and unicast in wireless cellular systems," *IEEE Commun. Magazine*, IEEE. Vol.46, pp.110-117, July, 2008.
- [11] E. Arıkan, "Channel polarization: A method for constructing capacity achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, July, 2008.
- [12] E. Arıkan, "Channel combining, and splitting for cutoff rate improvement," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.52, No.2, pp.628-639, Feb., 2006.
- [13] E. Arıkan and E. Telatar, "On the rate of channel polarization," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory*, pp. 1493-1495, Seoul, Korea, June, 2009.
- [14] E. Arıkan, "A performance comparison of polar codes and Reed-Muller codes," *IEEE Commun. Letters*, Vol.12, No.6, June, 2008.
- [15] S.B. Korada, E. Sasoglu and R. Urbanke, "Polar codes: Characterization of exponent, bounds, and constructions," submitted to *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2009.
- [16] N. Hussami, S.B. Korada and R. Urbanke, "Performance of polar codes for channel and source coding," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory*, pp.1488-1492, Seoul, Korea, June, 2009.
- [17] S.B. Korada and R. Urbanke, "Polar Codes for Slepian_wolf Wyner-Ziv and Gelfand-Pinsker", *IEEE Information Theory Workshop*, Cairo, January, 2010.

- [18] R. Mori and T. Tanaka, "Performance and Construction of Polar Codes on Symmetric Binary-Input Memoryless Channels," in Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory, pp.1496-1500, Seoul, Korea, June, 2009.
- [19] R. Mori and T. Tanaka, "Performance of polar codes with the construction using density evolution," IEEE Commun. Letters, Vol.13, No.7, pp.519-521, July, 2009.

저자소개



김 영 식

2001년 2월 서울대학교 전기공학부(학사)
 2003년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부(석사)
 2007년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부(박사)
 2007년 3월~현재 삼성전자 (DS부문) 책임연구원

주관심 분야 : 무선 보안, 스트림 암호, 오류정정부호, 시퀀스

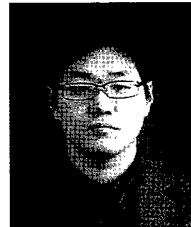
저자소개



김 상 효

1998년 2월 서울대학교 전기공학부(학사)
 2000년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부(석사)
 2004년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부(박사)
 2004년 3월~2006년 6월 삼성전자 (통신연구소) 책임
 연구원
 2006년 9월~2007년 8월 미국 남가주 대학교 방문연
 구원
 2007년 9월~현재 성균관대학교 조교수

주관심 분야 : 오류정정부호, 이동통신, 극부호, 시퀀스



장 지 응

2000년 2월 서울대학교 전기공학부(학사)
 2002년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부(석사)
 2006년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부(박사)
 2006년 3월~2008년 6월 삼성전자 (DS 부문) 책임
 연구원

2008년 8월~2009년 7월 UCSD 방문연구원
 2009년 9월~2010년 2월 LG전자 선임연구원
 2010년 3월~현재 LG전자 책임연구원

주관심 분야 : 오류정정부호, 협력통신, 시퀀스