

정보이론 관점에서 본 협력통신 및 릴레이 기법의 개요

강병준, 정세영
한국과학기술원

요약

본고에서는 통신 시스템을 이루는 노드들 간의 협력 통신을 정보이론적 관점에서 살펴본다. 특히 여러 가지 협력 통신 모델 중 가장 간단한 모델인 릴레이 채널에 대해 현재까지 발표된 여러 기법들을 소개하고, 각각을 통해 얻을 수 있는 전송량을 살펴본다.

I. 서론

최근 통신 시스템이 발전할수록, 통신 기기의 종류 및 빠른 통신 속도에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있으며, 이로 인해 네트워크 및 새로운 통신 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 무선통신기기의 사용이 대중화됨에 따라 무선통신 시스템을 이루는 노드들 간의 상호협력력을 통한 셀 커버리지 및 통신량의 증대가 많은 관심을 받고 있고 연구되고 있다. 특히 송신기가 수신기한테 필요한 정보를 전송할 때 릴레이 노드의 도움으로 통신의 질과 양을 향상시킬 수 있다. 이러한 노드들 간의 협력으로 가장 간단한 모델이 릴레이 채널이라고 할 수 있다. <그림 1>은 3-노드 릴레이 채널을 보여주고 있다. 이 모델에서 송신기는 릴레이 노드의 도움으로 수신기에 메시지를 전송하게 된다.

일반적으로 릴레이의 장점은 크게 세 가지가 있다. 먼저 기존 셀 커버리지 밖에 있는 단말을 커버하거나 음영 지역 (shadowing area)을 커버함으로써 커버리지를 증대시키는 효과가 있다. 그리고 기지국(base station)에 비해 상대적으로 낮

은 가격으로 구성할 수 있다. 또한 릴레이 노드가 송신단과 수신단 간 통신에 도움을 줌으로써 전송량에 이득이 생길 수 있다. 본고에서는 특히 세 번째 장점에 초점을 맞춰 서술하고자 한다.

최근 네트워크 정보이론 연구 결과에 의하면 N개의 노드를 가지는 일반적인 가우시안 멀티캐스트 네트워크에서 잡음 네트워크 코딩을 사용함으로써 정보이론적 커패시티로부터 $0.63N$ 비트 이내의 전송량을 달성한다는 것이 밝혀졌다 [1]. 그리고 현재까지 연구된 릴레이 기법 중, 구조화 코드를 사용하여 잡음과 간섭을 모두 제어하는 전송기법을 적절하게 사용했을 때, 쌍방 (two-way) 릴레이 채널(그림 8)에서 각 사용자 별 커패시티에 0.5비트 이내로 접근할 수 있고 전체 합 전송량(sum capacity)에는 $\log_2 1.5$ 비트 이내로 접근할 수 있다고 연구되었다 [2]. 또한 간섭 중화 기법 등 릴레이를 사용함으로써 큰 성능 향상을 야기하는 경우 전체 통신량 향상에 큰 도움이 될 수 있다.

릴레이 채널은 처음으로 van der Meulen에 의해서 연구되었다 [3]. 릴레이 노드가 어떤 방식으로 송신기를 돕는가에 따라 릴레이 채널의 송신기법을 분류할 수 있다. 그 중 증폭 후 전송 (amplify-and-forward) 기법은 릴레이 노드에서 받은 신호를 증폭한 뒤 전송하는 기법이고 [4], 압축 후 전송 (compress-and-forward) 기법은 릴레이 노드에서 받은 신호를 압축 (compress) 하여 전송하는 기법이다 [5]. 증폭 후 전송 기법과 압축 후 전송 기법에서의 특징은 릴레이 노드는 단지 신호를 증폭하거나 압축하는 역할을 수행하기 때문에 간섭신호를 수신기에서 처리하면 되는 반면 잡음 신호는 채널을 따라 증가한다는 단점이 있다.

또 다른 기법으로는 복호 후 전송(decode-and-forward) 기법이 있는데, 이를 사용하면 릴레이 노드에서 잡음 신호를 제거하는 것이 가능하다. 복호 후 전송 기법에서는 릴레이 노드는 수신한 신호의 잡음을 완벽히 제거한 뒤 메시지를 복구하게 된다. 그리고 그 메시지를 다시 인코딩해서 수신기에 전달한다 [5]. 복호 후 전송 기법을 사용하면, 비록 잡음 신호는 완벽히 제거할 수 있지만 릴레이 노드에서 디코딩을 해야 되기 때문에 간섭 신호에 대한 별도의 처리를 필요로 한다. 또한 계산 후 전

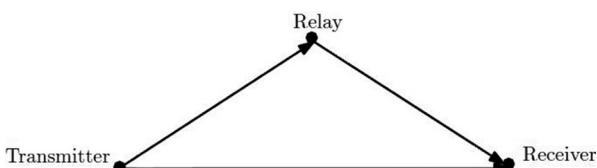


그림 1. 3-노드 릴레이 채널

송(compute-and-forward) 기법은 구조화 코드(structured code)를 사용하여 잡음신호와 간섭신호를 동시에 제어할 수 있는 기법이다.

본고에서는 위에서 언급한 릴레이 기법들과 이를 확장한 기법들에 대해 살펴본다. 각 기법들의 원리나 핵심 아이디어를 설명하고, 이를 통해 얻을 수 있는 전송량에 대해 살펴본다.

II. 시스템 모델

가장 간단한 릴레이 채널인 3-노드 릴레이 채널은 1개의 송신단과 1개의 수신단, 그리고 1개의 릴레이로 구성된다. 이때 이산 무기억 릴레이 채널 (discrete memoryless relay channel)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

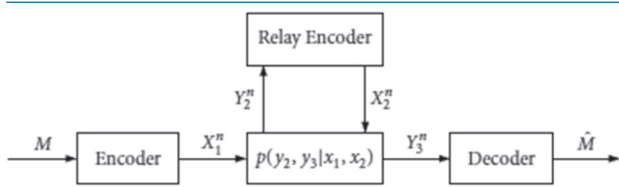


그림 2. 3-노드 이산 무기억 릴레이 채널

<그림 2>에서 릴레이 인코더는 송신단으로부터 $i-1$ 번째 신호까지 받아, 이 신호들을 바탕으로 i 번째 신호를 인코딩하여 전송한다.

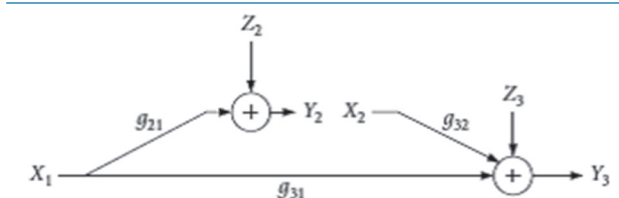


그림 3. 3-노드 가우시안 릴레이 채널

다음으로 가우시안 릴레이 채널을 살펴보자.

이 때 송신단과 수신단 사이의 입출력 관계는 다음과 같다.

$$Y_2 = g_{21}X_1 + Z_2$$

$$Y_3 = g_{31}X_1 + g_{32}X_2 + Z_3$$

여기서 잡음 Z_2, Z_3 은 AWGN(Additive white Gaussian noise)이고, 각각 평균은 0, 분산은 1이다. 모든 잡음은 서로 독립이며 송신 신호와도 독립이라고 가정한다.

III. 릴레이 기법

1. 증폭 후 전송 방식

증폭 후 전송 방식은 아날로그 릴레이 방식으로써 송신단으로부터 전송된 신호에 잡음이 섞인 신호를 릴레이가 받아 이를 증폭하여 재전송하는 방식이다. 이와 같은 간단한 방식으로 인해 실제로 구현하는데 있어 간단하고 저렴한 릴레이를 사용할 수 있게 해준다.

증폭 후 전송 방식에서는 잡음 또한 증폭되지만, 수신 단에서 각각 독립적인 채널을 거친 신호를 받음으로써 더 나은 결정(decision)을 할 수 있다. 이를 바탕으로 여러 가지 연구 결과가 나왔는데, 먼저 2001년 [6]에서 Laneman에 의해 높은 신호 대 잡음 비(SNR: Signal to noise power ratio) 대역에서 가능한 가장 좋은 결과인 diversity gain을 2배 향상시키는 방식이 제안되었다. 그리고 '04년 [7]에서 단일 안테나 릴레이에서 최적화된 공간 다이버시티 이득(spatial diversity gain)을 얻는 non-orthogonal 증폭 후 전송 기법을 제안하였고, 이를 단일 릴레이 채널에서 다중 릴레이 채널로 확장, 일반화하였다. 또한 [8]에서 다중안테나 증폭 후 전송 방식을 사용하여 최적화된 diversity-multiplexing tradeoff 성능을 얻었다.

최근 연구에 의하면 direct path에서 생기는 딜레이와 릴레이를 거치는 경로에서 생기는 딜레이의 차이인 딜레이 스프레드(delay spread)가 채널 대역폭(bandwidth)의 역수($1/W$)보다 훨씬 작을 때 instantaneous relay channel이라고 간주할 수 있는데, 이 경우 증폭 후 전송 방식이 다른 릴레이 기법들에 비해 좋은 성능을 보인다[9]. 이 채널 환경에서 증폭 후 전송 기법을 사용하는 경우, 순간적 증폭 후 전송 (instantaneous amplify-and-forward) 기법이라 부른다. 기존의 전통적인 증폭 후 전송 기법에서는 i 번째 타임 슬롯에서의 릴레이 수신 시퀀스는 1 번째부터 $i-1$ 번째 타임 슬롯에서의 릴레이 수신 시퀀스들의 함수이다. 하지만, 인스턴트 증폭 후 전송 기법에서

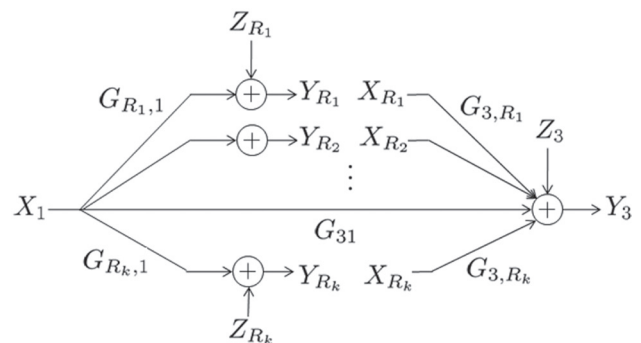


그림 4. MIMO 다중 릴레이 네트워크

는 릴레이 노드를 경유하는 패스에서 발생하는 딜레이가 없다고 간주될 만큼 딜레이 스프레드가 작으므로, i 번째 타임 슬롯에서의 릴레이 전송 시퀀스는 1 번째부터 i 번째 타임 슬롯들에서의 릴레이 수신 시퀀스들의 함수로 모델링 할 수 있다.

〈그림 4〉와 같은 송신 노드 1개, 수신 노드 1개, 릴레이 노드 k 개이고 각각이 다수의 안테나를 가지고 있는 MIMO 다중 릴레이 네트워크를 고려해보자. 이 채널에서 송신단과 수신단 사이의 입출력 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_{R_k}[n] &= G_{R_k,1} X_1[n] + Z_{R_k}[n], \\ Y_3[n] &= G_{31} X_1[n] + G_{3,R_1} X_{R_1}[n] + \dots + G_{3,R_k} X_{R_k}[n] + Z_3[n], \\ X_{R_k}[n] &= F_k Y_{R_k}[n] \end{aligned}$$

여기서 G_{ij} matrix들은 각각 노드 j 에서 노드 i 로의 MIMO 채널 이득이다. 잡음들은 시스템 모델에서의 잡음과 같은 성질을 가진다. X_1 은 송신단의 송신 신호, Y_3 은 수신단의 수신 신호, X_{R_k} 는 릴레이 송신 신호, Y_{R_k} 는 릴레이 수신 신호이고, $X_1[n]$ 은 n 번째 시간에서 송신 신호의 심볼을 의미한다. 이와 같은 채널 환경에서 릴레이 심볼이 $X_{R_k i} = f(Y_{R_k i})$ 으로 표현되는 것을 순간적 릴레이(instantaneous relay)라 하고, 위 릴레이 함수가 선형 매트릭스 F_k 의 곱으로 나타나지는 것을 순간적 증폭 후 전송 기법이라 한다. 이 기법은 특정한 릴레이 파워 조건을 만족시키면 다음과 같은 전송량을 얻으면서 최적의 성능을 보인다.

$$C \leq \frac{1}{2} \log \det \left(I + \begin{pmatrix} G_{R_1,1} \\ G_{R_2,1} \\ \vdots \\ G_{R_k,1} \\ G_{31} \end{pmatrix} K_{x_1} \begin{pmatrix} G_{R_1,1}^\dagger & G_{R_2,1}^\dagger & \dots & G_{R_k,1}^\dagger & G_{31}^\dagger \end{pmatrix} \right)$$

여기서 K_{x_1} 은 송신단의 공분산 행렬(covariance matrix)을 나타낸다.

2. 복호 후 전송 방식

복호 후 전송 방식은 송신단으로부터 전송된 신호를 릴레이에서 디코딩 후 다시 코딩하여 재전송하는 방식으로, 채널에 따른 적응이 쉽다. 증폭 후 전송 방식과는 달리 잡음이 전달되진 않지만, 릴레이가 메시지를 제대로 복원하지 못할 경우 릴레이에서 복원할 때 발생한 오류 정보가 수신단에 그대로 전달되어 다이버시티 이득을 줄이게 된다.

이러한 복호 후 전송 방식은 릴레이가 송신단에 가까운 상황과 같이 송신단과 릴레이 사이의 채널이 릴레이와 수신단 사이의 채널보다 좋은 경우, 압축 후 전송 방식보다 좋은 성능을 보인다.

일반적인 이산 무기역 릴레이 채널에서 복호 후 전송 방식을

이용하여 얻을 수 있는 전송량은 다음과 같다 [10].

$$R = \max_{p(x_1, x_2)} \min\{I(X_1, X_2; Y_3), I(X_1; Y_2 | X_2)\}$$

여기서 $I(X; Y)$ 는 X 와 Y 간의 상호 정보량 (mutual information)을 나타낸다.

3. 압축 후 전송 방식

압축 후 전송 방식은 릴레이에서 받은 신호를 압축하여 전송하는 기법이다. 이 방식을 통해 얻을 수 있는 전송량은 다음과 같다 [10].

$$R = \max_{p(x_1)p(x_2)p(\hat{y}_2|x_2, y_2)} \min\{I(X_1, X_2; Y_3) - I(Y_2; \hat{Y}_2 | X_1, X_2, Y_3), I(X_1; \hat{Y}_2, Y_3 | X_2)\}$$

압축 후 전송 방식에서 릴레이는 단지 받은 신호를 압축하여 보내기 때문에 잡음 신호가 채널을 따라 증가한다는 단점이 있다.

이러한 단점에도 불구하고 최근 연구 결과에 의하면 압축 후 전송 방식을 통해 일부 deterministic한 릴레이 채널 [11]과 modulo-sum 릴레이 채널 [12]의 이론적 한계를 달성함을 확인할 수 있다.

4. 잡음 네트워크 코딩 기법

유선 네트워크의 정보 이론적 용량(capacity)를 규명한 대표적인 두 가지 결과로 1956년 max-flow min-cut 정리 [13] 및 2000년 네트워크 코딩(network coding) [14]이 있다. max-flow min-cut 정리에서는 네트워크상에서 소스(source)와 데스티네이션(destination)이 각각 하나일 때 다중 경로 라우팅(multipath routing)이 정보 이론적 용량을 달성함을 증명하였고, 네트워크 코딩 결과는 이를 멀티캐스트(multicast) 환경으로 확장하여 그 때 네트워크 코딩이 최적임을 보이고 있다. 이 두 가지 결과에서는 단순한 유선망을 가정하고 있는데, 최근 연구 결과인 잡음 네트워크 코딩(noisy network coding) 기법에서는 이것을 간섭 및 노이즈가 있는 일반적인 네트워크로 확장한 상황을 다룬다 [1]. 잡음 네트워크 코딩 기법 결과는 기존의 압축 후 전송 기법을 일반적인 네트워크 상황으로 확장한 것이기도 하며 결과적으로 네트워크 코딩과 압축 후 전송 두 가지 서로 다른 연구 흐름을 하나의 이론으로 통일하고 있다. 이러한 잡음 네트워크 코딩 기법을 사용하면 임의의 멀티캐스트 가우시안 릴레이 네트워크에서 커패시티에 가장 근접한 성능을 달성하는 것이 가능하다.

이 잡음 네트워크 코딩 기법은 크게 송신단에서의 코딩 방

식, 릴레이 노드에서의 압축 방식, 수신단에서의 디코딩 방식으로 세분화할 수 있다. 기존의 전통적인 압축 후 전송 방식의 경우, 송신단에서는 여러 메시지를 여러 블록(block)에 정보를 실어 신호를 전송하고 수신단에서는 한 번에 한 메시지를 디코딩하는 방식을 취했다. 하지만 잡음 네트워크 코딩 기법에서 송신단은 한 메시지를 독립적인 코드북(codebook)을 이용하여 여러 블록에 걸쳐 전송하고 수신단에서는 전체 블록을 보고 jointly typical decoding 기법을 통해 송신 메시지를 추정한다.

위의 인코딩, 압축, 디코딩 방식과 더불어 수신단에서 원하지 않는 다른 간섭신호까지도 디코딩하는 방식 또는 간섭신호를 디코딩하지 않고 잡음으로 취급하여 디코딩하는 방식을 통해 얻어진 성능은 다음과 같다 [1].

〈NNC with Simultaneous nonunique decoding〉

만약 모든 cutset $S \subseteq [1:N](S^c \cap D(S) \neq \emptyset, \text{ where } D(S) := \cup_{k \in S} D_k)$ 에 대해 아래 식을 만족시키는 어떠한 확률 분포 $p(q) \prod_{k=1}^N p(x_k|q)p(\hat{y}_k|y_k, x_k, q)$ 이 존재한다면,

$$R(S) < \min_{d \in S^c \cap D(S)} I(X(S); \hat{Y}(S^c), Y_d|X(S^c), Q) - I(Y(S); \hat{Y}(S)|X^N, \hat{Y}(S^c), Y_d, Q),$$

전송률(rate) 집합 (R_1, \dots, R_N) 은 달성 가능하다.

〈NNC with Treating interference as noise〉

만약 모든 cutset $S \subseteq [1:N](d \in D(S), S \cap S_d \subseteq T \subseteq S_d), S^c \cap D(S) \neq \emptyset, T^c = S_d \setminus T$ 에 대해 아래 식을 만족시키는 어떠한 확률분포 $p(q) \prod_{k=1}^N p(u_k, x_k|q)p(\hat{y}_k|y_k, u_k, q)$ 이 존재한다면,

$$R(T) < I(X(T), U(S); \hat{Y}(S^c), Y_d|X(T^c), U(S^c), Q) - I(Y(S); \hat{Y}(S)|X(S_d), U^N, \hat{Y}(S^c), Y_d, Q)$$

전송률 집합 (R_1, \dots, R_N) 은 달성 가능하다.

또한, 가우시안 멀티캐스트 네트워크인 $Y^N = GX^N + Z^N, Z^N \sim N(0,1)$ 에 대해 제한 전송방식을 통해 얻어지는 전체 전송률(sum rate)과 cutset upper bound와의 차이는 $0.63N$ 이하로, 채널과 상관없이 노드의 수에만 의존하는 값이다 [1]. 따라서 잡음 네트워크 코딩 기법으로 얻어진 성능은 채널에 관계 없이 이론적 한계와 근접한 성능을 제공한다는 것을 확인할 수 있다.

– 간섭 릴레이 채널에서의 잡음 네트워크 코딩 기법

잡음 네트워크 코딩 기법은 여러 가지 채널에서 활용될 수 있지만, 본고에서는 특히 최근 많은 연구가 진행 중인 간섭 릴레이

이 채널에 잡음 네트워크 코딩 기법을 적용하는 경우를 살펴보고자 한다.

먼저 릴레이가 여러 개인 이산 무기억 간섭 릴레이 채널은 다음과 같이 표현할 수 있다.

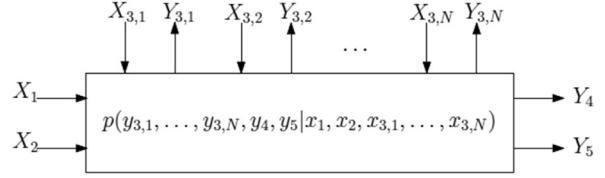


그림 5. 이산 무기억 간섭 다중릴레이 채널

이와 같은 채널에서 잡음 네트워크 코딩 기법을 적용할 수 있다. 앞에서 언급했듯이 잡음 네트워크 코딩 기법과 simultaneous nonunique decoding 기법 또는 treating interference as noise 기법을 사용한 경우는 [1]에서 다뤘다. 하지만 간섭 채널에서 적용 가능한 기법 중 이 두 가지 디코딩 방식을 모두 아우르는 방식인 Han-Kobayashi scheme이 존재한다. 이는 간섭 채널에서 현존하는 기법들 중 가장 좋은 성능을 보인다. 따라서 간섭 릴레이 채널에서 잡음 네트워크 코딩 기법과 Han-Kobayashi scheme을 결합하는 것은 자연스럽게 도출될 수 있는 아이디어이고, 최근 이에 대한 결과도 연구되었다 [15]. 이 연구 결과에 의하면 위와 같은 이산 무기억 간섭 릴레이 채널에 대해 잡음 네트워크 코딩 기법과 Han-Kobayashi scheme을 결합하여 얻을 수 있는 전송량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_1 &< \min_S \{I(X_1, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_4|U_2, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_1, U_2, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_4)\} \\ R_2 &< \min_S \{I(X_2, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_5|U_1, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_2, U_1, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_5)\} \\ R_1 + R_2 &< \min_S \{I(X_1, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_4|U_1, U_2, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_1, U_2, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_4)\} \\ &\quad + \min_S \{I(X_2, U_1, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_5|X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_2, U_1, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_5)\} \\ R_1 + R_2 &< \min_S \{I(X_2, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_5|U_1, U_2, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_2, U_1, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_5)\} \\ &\quad + \min_S \{I(X_1, U_2, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_4|X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_1, U_2, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_4)\} \\ R_1 + R_2 &< \min_S \{I(X_1, U_2, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_4|U_1, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_1, U_2, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_4)\} \\ &\quad + \min_S \{I(X_2, U_1, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_5|U_2, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_2, U_1, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_5)\} \\ 2R_1 + R_2 &< \min_S \{I(X_1, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_4|U_1, U_2, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_1, U_2, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_4)\} \\ &\quad + \min_S \{I(X_1, U_2, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_4|X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_1, U_2, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_4)\} \\ &\quad + \min_S \{I(X_2, U_1, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_5|U_2, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_2, U_1, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_5)\} \\ R_1 + 2R_2 &< \min_S \{I(X_2, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_5|U_1, U_2, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_2, U_1, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_5)\} \\ &\quad + \min_S \{I(X_2, U_1, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_5|X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_2, U_1, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_5)\} \\ &\quad + \min_S \{I(X_1, U_2, X_3(S); \hat{Y}_3(S^c), Y_4|U_1, X_3(S^c)) - I(\hat{Y}_3(S); Y_3(S)|X_1, U_2, X_3^N, \hat{Y}_3(S^c), Y_4)\} \end{aligned}$$

for all subsets $S \subseteq [1:N]$ such that $X_3(S) \subset \{X_{3,1}, \dots, X_{3,N}\}$ which are relay nodes.

이 결과를 특정 injective deterministic 이산 무기억 간섭 릴레이 채널에 적용하면 정보이론적 커패시티를 달성한다

[15]. 다음으로 직교 수신기 구성요소 (orthogonal receiver components)를 가지는 가우시안 간섭 릴레이 채널을 살펴보자.

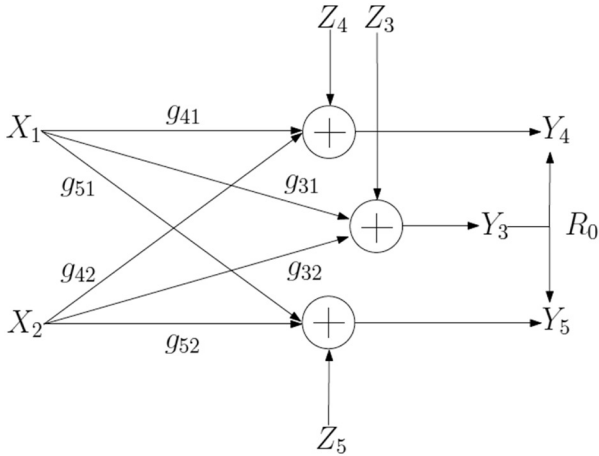


그림 6. 직교 수신기 구성요소를 가지는 가우시안 간섭 릴레이 채널

이 때 송신단과 수신단 사이의 입출력 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_3 &= g_{31}X_1 + g_{32}X_2 + Z_3 \\ Y_4 &= g_{41}X_1 + g_{42}X_2 + Z_4 \\ Y_5 &= g_{51}X_1 + g_{52}X_2 + Z_5 \end{aligned}$$

릴레이는 두 수신단에 R_0 의 용량을 가지는 noiseless link를 통해 Y_3 에 대한 정보를 보냄으로써 두 송신기-수신기 쌍의 통신을 돕는다.

이와 같은 채널에서 기존 잡음 네트워크 코딩 기법과 Han-Kobayashi scheme을 결합한 잡음 네트워크 코딩 기법 간의 성능을 전체 전송량 측면에서 비교하면 다음과 같다 [15].

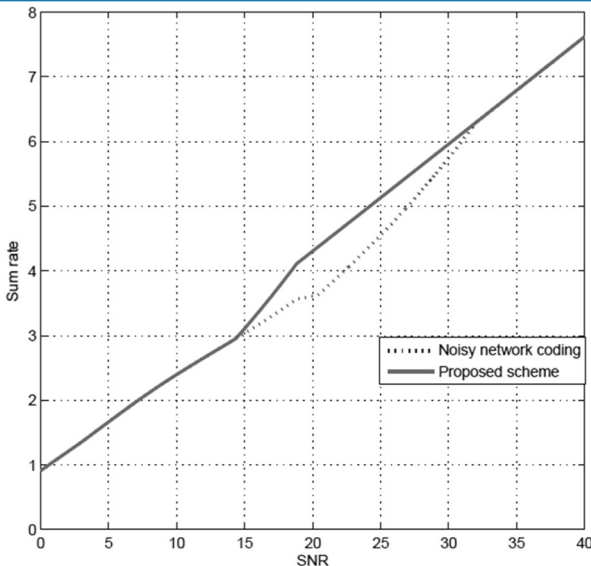


그림 7. 전송 기법들의 성능 비교

<그림 7>에서 알 수 있듯이 Han-Kobayashi scheme을 결합시킴으로써 잡음 네트워크 코딩 기법의 성능을 향상시킬 수 있다.

5. 구조화 코드

위에서 언급한 기법들은 릴레이 노드에서 많이 사용되는 기법으로써, 잡음신호와 간섭신호를 동시에 제어할 수 없다는 문제점을 갖고 있다. 그러나 최근 잡음신호와 간섭신호를 동시에 제어할 수 있는 새로운 기법으로 계산 후 전송 기법이 제안되었는데, 이 방식은 릴레이에서 정확한 메시지를 복구하는 것뿐만 아니라, 송신기에서 보낸 코드워드 (codeword)들의 선형 결합 (linear combination)을 복구하고 다시 인코딩해서 전송한다. 이 때, 격자 코드 (lattice code)와 같은 구조화 코드를 송신기와 릴레이에서 동시에 사용하여 전반적인 메시지가 복구되는 것을 보장한다. 구조화 코드를 릴레이 기법에서 사용함에 있어서 보통 한 구조화 코드의 코드워드들의 선형조합도 코드워드라는 중요한 성질과 구조화 코드를 중첩 (superposition)되게 사용하여 코드워드들을 셰이핑 (shaping) 해주는 성질을 이용하고 있다 [16]. 이와 같은 중첩 격자 코드는 다음과 같은 가우시안 쌍방향 릴레이 채널 (Gaussian two-way relay channel)에 적용될 수 있다.

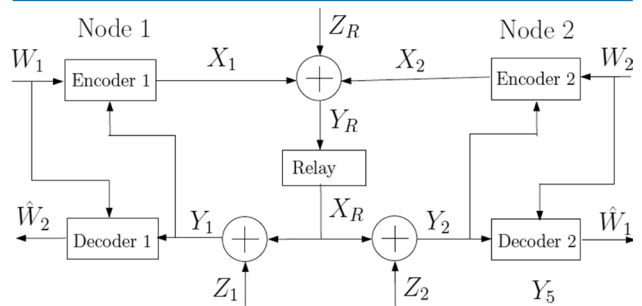


그림 8. 쌍방향 릴레이 채널

이 때 송신단과 수신단 사이의 입출력 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_R^{(t)} &= X_1^{(t)} + X_2^{(t)} + Z_R^{(t)} \\ Y_i^{(t)} &= X_R^{(t)} + Z_i^{(t)}, i \in \{1, 2\} \end{aligned}$$

여기서 $X_i^{(t)}$ 는 노드 i 가 시간 t 에 보낸 신호이고, $Y_j^{(t)}$ 는 노드 j 가 시간 t 에 받은 신호이다. 그리고 X_R, X_1, X_2 는 각각 P_R, P_1, P_2 의 파워 제한을 가진다. 또한 잡음 Z_R, Z_1, Z_2 는 AWGN이고, 평균은 0, 분산은 각각 $\sigma_R^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2$ 이다. 모든 잡음은 서로 독립이며 송신 신호와도 독립이라고 가정한다. 이러한 채널에 대해 위에서 언급한 중첩 격자 코드를 사용하여 얻을 수 있는 전송량은

다음과 같다.

$$R_1 \leq \min \left\{ \left[\frac{1}{2} \log \left(\frac{P_1}{P_1 + P_2} + \frac{P_1}{\sigma_R^2} \right) \right]^+ \right. \\ \left. \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_R}{\sigma_2^2} \right) \right\} \\ R_2 \leq \min \left\{ \left[\frac{1}{2} \log \left(\frac{P_2}{P_1 + P_2} + \frac{P_2}{\sigma_R^2} \right) \right]^+ \right. \\ \left. \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P_R}{\sigma_1^2} \right) \right\}$$

여기서 $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 를 뜻한다. 위의 전송량과 cutset bound와의 차이가 커패시티 영역 측면에서 0.5 비트 이하이고, 전체 전송량 측면에서는 $\log_2 1.5$ 비트 이하인 것으로 밝혀졌다 [16].

IV. 결론

본고에서는 통신 시스템을 이루는 노드들 간의 협력 통신을 정보이론적 관점에서 살펴보았다. 특히 여러 가지 협력 통신 모델 중 가장 간단한 모델인 릴레이 채널에서 사용되는 대표적인 기법들인 증폭 후 전송 방식, 복호 후 전송 방식, 압축 후 전송 방식, 잡음 네트워크 코딩 기법, 그리고 구조화 코드에 대해 핵심 아이디어와 관련된 연구 결과를 설명하고, 각 릴레이 기법들을 통해 얻을 수 있는 전송량을 기술하였다.

참고 문헌

- [1] S. H. Lim, Y.-H. Kim, A. El Gamal, and S.-Y. Chung, "Noisy network coding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, pp. 3132–3152, May 2011.
- [2] Wooseok Nam, Sae-Young Chung, and Yong H. Lee, "Capacity of the Gaussian two-way relay channel to within 1/2 bit", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 11, Nov. 2010.
- [3] E. C. van der Meulen, "Three-terminal communication channels", *Adv. Appl. Prob.*, vol. 3, pp. 120–154, 1971.
- [4] B. Schein and R. G. Gallager, "The Gaussian parallel relay network", in *Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory*, Sorrento, Italy, pp. 22, Jun. 2000.
- [5] T. M. Cover and A. El Gamal, "Capacity theorems for the relay channel", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 25, no. 5, pp. 572–584, Sep. 1979.
- [6] J. Nicholas Laneman, Gregory W. Wornell, David N. C. Tse, "An Efficient protocol for Realizing Cooperative Diversity in Wireless Networks," *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, June 2001.
- [7] Rohit U. Nabar, Helmut Bölcskei and Felix W. Kneubühler, "Fading Relay Channels: Performance Limits and Space-Time Signal Design," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 1099–1109, Aug. 2004.
- [8] Sheng Yang and Jean-Claude Belfiore, "Optimal Space-Time Codes for the MIMO Amplify-and-Forward Cooperative Channel," *International Zurich Seminar on Communications*, Feb. 2006.
- [9] Ihn-Jung Baik and Sae-Young Chung, "Causal relay networks and new cut-set bounds," in *Proc. Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Monticello, IL, Sep. 2011.
- [10] A. El Gamal and Y.-H. Kim, *Network Information Theory*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2011.
- [11] Y.-H. Kim, "Capacity of a class of deterministic relay channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, pp. 1328–1329, Mar. 2008.
- [12] M. Aleksic, P. Razaghi, and W. Yu, "Capacity of a class of modulo-sum relay channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, pp. 921–930, Mar. 2009.
- [13] L. R. Ford, Jr. and D. R. Fulkerson, "Maximal flow through a network," *Canad. J. Math.*, vol. 8, pp. 399–404, 1956
- [14] Rudolf Ahlswede, Ning Cai, Shuo-Yen Robert Li, and Raymond W. Yeung, "Network information flow", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, Jul. 2000.
- [15] B.-J. Kang, S.-H. Lee, S.-Y. Chung, and C.-H. Suh, "A new achievable scheme for interference relay channels," [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1303.1095>.
- [16] Wooseok Nam, Sae-Young Chung, and Yong H. Lee, "Capacity of the Gaussian two-way relay channel to

within 1/2 bit", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 56, no. 11, Nov. 2010.

약 력



강 병 준

2010년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사
2013년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
2013년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
과정
관심분야: Network information theory.



정 세 영

1990년 서울대학교 전기공학과 학사
1992년 서울대학교 전기공학과 석사
2000년 MIT EECS 박사
2005년~현재 한국과학기술원 (현) 카이스트 지정
석좌 교수
관심분야: Network information theory.