가상 전이중 (Virtual Full-Duplex) 중계전송 기법

정방철, 김수민*
충남대학교, 한국산업기술대학교*

요 약

본고에서는 5세대 이동통신 핵심기술 중 하나인 전이중 (full-duplex) 전송기술의 이득을 성취할 수 있는 새로운 접근 방법인 가상 전이중 (virtual full-duplex) 중계전송 기법에 대해서 알아본다. 이는 아직 실제적인 제약들을 해결해야 하는 전이중 중계전송 기술의 대안으로 반이중 (half-duplex) 중계기 2개를 하나의 가상 중계기로 고려함으로써 네트워크 차원에서는 송신과 수신이 동시에 이루어지도록 하여 전이중 중계전송의 효과를 얻는 기술이다. 본고에서는 먼저, 중계기에서 메모리를 고려하지 않고, 2개의 중계기를 번갈아 가면서 사용하는 2경로 (two-path) 교차 (alternating) 중계전송 기법을 살펴보고, 다음으로 중계기에 버퍼를 장착한 다수 중계기 네트워크에서 가상 전이중 중계전송 기법에 대해서 알아본다.

Ⅰ. 서 론

전이중 (full-duplex) 전송 기술은 5세대 이동통신 핵심 키워드 중 하나이다. 상향링크와 하향링크를 동시에 전송하는 기술로서 기존 통신방식의 2배 전송률을 달성할 수 있기 때문에 이미 포화상태에 접어든 물리계층 수율 (throughput) 성능을 한 단계 더 진화시킬 수 있을 것으로 기대되는 기술이다. 이상적으로는 모든 통신노드가 서로 송수신을 동시에 할 수 있으면 모든 링크에서 2배의 전송률을 성취할 수 있지만, 현재까지는 주로 중계노드에 전이중 전송 기술을 적용하여 소스노드로부터 데이터를 수신함과 동시에 이전 시간슬롯에서 수신한 데이터를 목적노드로 송신하는 많은 연구들이 진행되어 왔다[1][2][3].

최근에서는 실제로 IEEE 802.15.4, WiFi, Software Defined Radio (SDR) 기반의 하드웨어 플랫폼에서 3GPP LTE 통신프로토콜로 전이중 중계전송을 구현하는 연구들도 진행되어 왔다[4]-[7]. 이러한 전이중 중계전송 구현 연구에서 주된 쟁점은 중계노드에서 송신한 신호가 자신의 송신안테나와 매우 근접한 수신안테나로 다시 들어오는 강한 자기간섭 (self-interference)의 제거이다. 간섭량이 상당하기 때문에 현존하는 가능한 모든 간섭제거 기술을 결합하는 접근을 취하게 된다. 즉, 아날로그 송신신호를 되먹임 (feedback) 시켜서 제거하는 하드웨어적 간섭 제거기술, 안테나의 위치를 잘 배치하여 방사패턴이 서로 상쇄되도록 하는 안테나 구분 (antenna separation) 기술, 간섭채널의 무선 채널정보를 추정하고 송신신호를 설계하여 간섭이 미리 제거될 수 있도록 하는 디지털 간섭제거 기술들이 총체적으로 적용된다. 하지만 하드웨어 소자의 불완전함, 다양한 무선채널 대역폭 및 중심 주파수, 복잡한 다수노드 간섭상황 등으로 아직은 특수한 환경에서만 구현이 가능한 수준으로 실제 시스템에 적용하기 위해서는 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 전망된다.

따라서 다른 방식으로 전이중 중계전송을 구현할 수 있는 연구들이 진행되어 왔다. 대표적으로 소스노드, 2개의 중계노드, 목적노드로 구성된 4노드 중계전송 네트워크에서 하나의 중계노드는 수신, 다른 중계노드는 송신을 동시에 수행하도록 하고, 이러한 동작을 매 시간슬롯에서 중계노드들이 송신과 수신의 역할을 서로 번갈아 가면서 하는 2경로 (two-path) 교차 (alternating) 중계전송 기술이 제안되었다[9]-[13]. 이 기술은 2개의 중계기가 연속적으로 역할을 서로 바꾸어 수행하기 때문에 연속 중계전송 (successive relaying) 으로도 알려져 있다. 또한, 다수 중계기가 존재하는 네트워크로 확장하여 중계기 선택 다이버시티 (selection diversity)를 얻고, 중계기 간 간섭 (inter-relay interference) 제거 성능을 높이는 연구도 진행되었다[14][15][16]. 다수 중계기 네트워크에서는 다수 중계기 중에서 최적의 송신 중계기, 수신 중계기 쌍을 선택하고, 나머지 중계기는 중계기 간 간섭제거에 활용하는 방식이 제안되었다.

한편, 최근에는 중계기에 버퍼를 장착하여 링크, 중계기 선택 다이버시티를 증가시키는 버퍼도움 중계전송 기법들이 제안되어 왔다[17]. 중계기에 장착된 버퍼는 이전 시간슬롯에서 수신한 데이터를 바로 다음 시간슬롯에서 포워딩해야 하는 제약조건을 완화하고, 채널상태정보 (channel state information)와 버퍼상태정보 (buffer state information)를 기반으로 기회주

의적 (opportunistic)으로 링크를 선택하여 데이터를 전송하게 함으로써 중계 네트워크의 전체 성능을 향상시킬 수 있다. 가장 간단한 3노드 네트워크에서 최적의 링크를 선택하는 연구가 선행되었고, 최근에는 다수 버퍼도움 중계기 네트워크로 확장하여 최적의 중계기 선택 기법들이 제안되었다. 하지만 기본적으로 반이중 중계기 하나가 송신 또는 수신 역할을 하기 때문에 평균채널이 매우 불균형한 환경과 같은 특수한 상황에서는 이득이 있지만, 실질적인 전이중 (full-duplex) 전송을 구현하지는 못하였다.

따라서 전이중 전송을 모사하기 위하여 다수 버퍼도움 중계기 네트워크에서 최적의 송수신 중계기 쌍을 선택적으로 운용하는 가상 전이중 (virtual full-duplex) 중계전송 기법들이 제안되었다[18]-[22]. 이에 의하면 하나의 중계기가 소스노드로부터 새로운 데이터를 수신하는 동안, 다른 중계기는 이전에 수신하여 버퍼에 저장해둔 데이터를 목적노드로 동시에 송신한다. 이 기술은 송수신 중계기를 통합해서 보면 전이중 중계전송이 이루어지는 것으로 간주할 수 있어 가상 전이중 중계전송이라 불린다. 전이중 (full-duplex) 중계전송에서 강한 자기간섭 (self-interference)를 제거하는 것이 주요 쟁점이듯이 가상 전이중 중계전송에서도 송신 중계기가 수신 중계기에 주는 중계기 간 간섭을 제거하는 것이 중요한 쟁점이 된다. 하지만 전이중 (full-duplex) 중계전송에서는 동일한 노드에 존재하는 매우 가까운 송신안테나와 수신안테나 사이의 간섭인 반면, 가상 전이중 (virtual full-duplex) 중계전송에서는 상대적으로 멀리 떨어져 있는 중계기 간의 간섭이기 때문에 간섭량의 정도가 훨씬 적어 간섭 제거가 용이하기 때문에 현재로서는 보다 현실적인 기술이라 할 수 있다. 이러한 점 때문에 가상 전이중 버퍼도움 중계전송 (virtual full-duplex buffer-aided relaying) 기술[21][22]은 유럽의 5세대 이동통신 핵심 기술 개발을 위한 가장 큰 프로젝트였던 METIS[23]에서 유망한 핵심 요소기술 중 하나로 평가되었다.

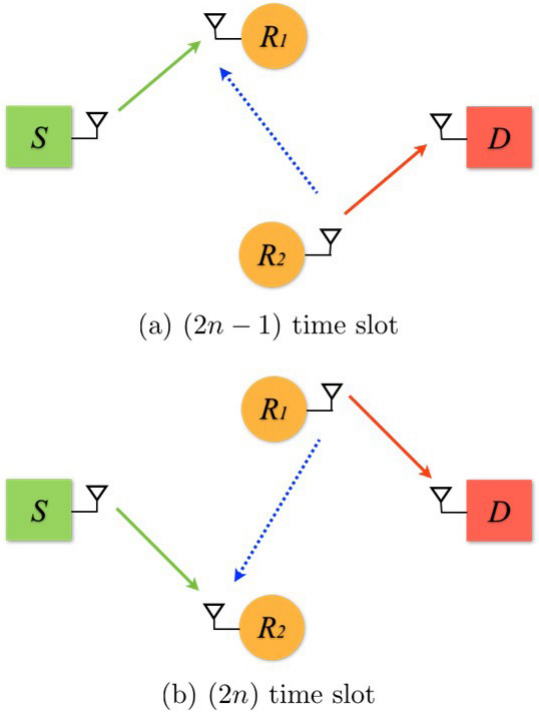

그림 1. 2경로 교차 중계전송 기법: (a) 홀수 시간슬롯 (b) 짝수 시간슬롯

본고의 이후에서는 Ⅱ장에서 2경로 교차 중계전송 기법의 기본 개념과 기존 연구결과들을 살펴본다. Ⅲ장에서는 중계기에 버퍼를 장착하여 이용하는 다수 버퍼도움 중계기 네트워크에서 제안된 가상 전이중 중계전송 기법들을 소개하고 이들의 성능을 비교하여 살펴본다. 마지막으로 Ⅳ장에서 본고의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 2경로 (Two-Path) 교차 (Alternating) 중계전송 기법

〈그림 1〉은 2경로 교차 중계전송 기법의 동작 과정을 보여준다. 홀수 시간슬롯에서 중계기$_1$이 소스노드로부터 데이터를 수신하고, 중계기$_2$는 이전 시간슬롯에서 수신한 데이터를 목적노드로 송신한다. 짝수 시간슬롯에서는 중계기들이 역할을 바꾸어 중계기$_1$은 이전 시간슬롯에서 수신한 데이터를 목적노드로 송신하고, 중계기$_2$는 소스노드로부터 새로운 데이터를 수신한다. 첫번째 시간슬롯에서는 중계기$_2$는 전송할 데이터가 없기 때문에 중계기$_1$이 수신만 하게 되고, 마지막 N번째 시간슬롯에서는 중계기$_1$만 목적노드로 송신하고 종료하게 된다. 따라서 $(N-2)/N$ 인자 만큼만 전이중 전송이 되고, $2/N$ 인자 만큼은 반이중 전송이 된다. N이 충분히 크다면 $2/N$ 는 무시할 수 있는 수준이 되어 거의 전이중 전송이 이루어질 수 있다.

이러한 2경로 교차 중계전송에서는 2개의 중계기가 지리적으로 떨어져 있긴 하지만, 동시에 전송이 일어나기 때문에 중계기 간 간섭이 발생한다. 따라서 이러한 중계기 간 간섭을 제거하기 위해서 다양한 프로토콜과 코딩기법들이 제안되었다[8]-[11]. 세부적으로 프로토콜적인 간섭 조정 방법[8]과 소스노드와 목적노드 사이에 직접채널이 존재하는 상황과 존재하지 않는 상황에서 코딩기법[9][10]에 의한 간섭제거 방안이 제안되었다. 증폭및포워딩 (amplify-and-forward) 중계기 선택 및 파워할당에 의한 간섭완화와 다중안테나 기술을 이용한 간섭제거 방

법[12]도 제안이 되었다. 또한, 오류률과 전송률 사이의 트레이드오프 관계를 직관적으로 보여줄 수 있는 다이버시티-다중화 드레이드오프 (diversity-multiplexing tradeoff) 분석 연구도 진행되었다[13][14].

중계기 수를 늘려 다수 중계기 네트워크로 확장하여 선택적으로 송수신 중계기를 결정하여 전송하는 프로토콜들도 제안이 되었다[14]-[17]. 다수 중계기 네트워크에서는 브로트케스팅 (broadcast) 특성으로 인하여 소스노드가 전송하는 데이터를 모든 중계기가 수신 가능하다. 성공적으로 데이터를 수신한 중계기 중에서 목적노드로의 채널이 좋은 중계기가 데이터를 포워딩하면 최적의 중계기로 전송이 가능하다. 두번째 시간슬롯부터는 선택된 중계기는 목적노드로 전송을 하고, 동시에 선택되지 않은 $(K-1)$ 중계기는 소스노드로부터 새로운 데이터를 수신할 수 있다. 그리고 $(K-1)$ 중계기 중에서 성공적으로 수신한 중계기는 목적노드로 데이터를 포워딩할 후보들이 되고, 다음 시간슬롯에서 그 중에서 최적의 중계기가 선택되어 전송한다. 따라서 2개의 중계기로 역할을 서로 교차해가면서 전송하는 것보다 소스노드-중계노드 전송에서 다이버시티가 중계기 수에 따라 증가하게 되어 특히, 오류율 측면에서 큰 성능 향상을 기대할 수 있다.

Ⅲ. 가상 전이중 (Virtual Full-Duplex) 중계전송 기법

본 장에서는 중계기에 버퍼를 활용하여 보다 적극적으로 전이중 (full-duplex) 중계전송을 현실화하는 가상 전이중 (virtual full-duplex) 중계전송 기법들에 대해서 살펴본다. 기존의 반이중 (half-duplex) 버퍼도움 (buffer-aided) 중계전송 기법들도 반이중 전송의 손실을 어느정도 극복할 수 있었으나, 근본적으로 어떠한 환경에서도 전이중 전송의 성능을 성취할 수는 없었다. 여기서 소개하는 기법들은 반이중 버퍼도움 중계기를 2개 이상 활용하여 반이중 전송의 손실을 극복하고 실효적으로 전이중 전송의 성능을 성취할 수 있는 기법들이다.

다수 중계기 네트워크의 2경로 (two-path) 교차 (alternating) 중계전송과 비교하면, 2경로 교차 중계전송에서는 송신중계기는 항상 바로 직전 시간슬롯에서의 수신중계기가 되어야 하지만 버퍼의 활용으로 버퍼도움 중계기 네트워크에서는 직전 시간슬롯이 아니더라도 이전 시간슬롯들에서 수신한 데이터는 버퍼에 저장이 되기 때문에 선택 다이버시티 (selection diversity) 이득이 그만큼 커질 수 있다.

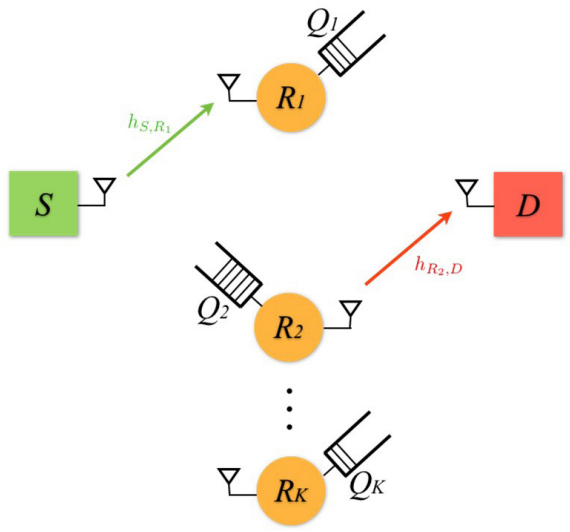

그림 2. 공간 전이중 최대-최대 중계기 선택 기법 (Space Full-Duplex Max-Max Relay Selection)

1. 공간 전이중 최대-최대 중계기 선택 기법 (Space Full-Duplex Max-Max Relay Selection)

〈그림 2〉에서 보는 바와 같이 [18]에서는 중계기에서 지향성 안테나 사용을 가정하여 송신중계기가 수신중계기에 간섭을 주지 않는 이상적인 환경에서 공간 전이중 최대-최대 중계기 선택 (SFD-MMRS) 기법이 제안되었다. 이 경우에는 중계기 간 간섭이 없기 때문에 소스노드-중계노드, 중계노드-목적노드 채널은 독립적으로 볼 수 있어서 각 링크에서 채널이득이 최대인 중계기를 선택하면 된다. 하지만 선택되는 중계기의 버퍼상태와 송신중계기와 수신중계기가 동일한 중계기가 될 수 없는 조건들을 고려해야 한다. 따라서 공간 전이중 최대-최대 송수신 중계기 선택 방법을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$i_1 = \underset{i\in\{1,\cdots,K\}}{\operatorname{argmax}}\, C_{Si}(t), \qquad i_2 = \underset{i\in\{1,\cdots,K\}\setminus\{i_1\}}{\operatorname{argmax}}\, C_{Si}(t),$$
$$j_1 = \underset{j\in\{1,\cdots,K\}}{\operatorname{argmax}}\, C_{jD}(t), \qquad j_2 = \underset{j\in\{1,\cdots,K\}\setminus\{j_1\}}{\operatorname{argmax}}\, C_{jD}(t),$$

여기서 i_1 는 최적 수신중계기, i_2 는 두번째 최적 수신중계기, j_1 는 최적 송신중계기, j_2 는 두번째 최적 송신중계기이다. 그리고 소스노드-중계노드 링크의 실효 전송률은 $C_{Si}(t) = \min\{\log_2(1+\mathrm{SNR}_{Si}(t)),\ Q_{\max} - Q_i(t-1)\}$, 중계노드-목적노드 링크의 실효 전송률은 $C_{jD}(t) = \min\{\log_2(1+\mathrm{SNR}_{jD}(t)),\ Q_j(t-1)\}$이다. 여기서 $Q_{\max}$ 는 최대 버퍼 사이즈, $Q_i(t)$ 는 중계기 i 의 시간 t 일때의 버퍼의 길이이다. 이에 의하면 채널상태가 좋아도 수신중계기의 남은 버퍼양은 충분하지 않으면 그 이상으로 수신할 수 없고, 송신중

계기의 버퍼에 보낼 데이터가 없으면 전송할 수가 없다. 또한, 수신중계기가 송신중계기는 동일한 중계기가 될 수 없기 때문에 최종적으로 최적 송수신 중계기는 다음으로 결정된다.

$$(i^*, j^*) = \begin{cases} (i_1, j_1) & \text{if } i_1 \neq j_1 \\ (i_2, j_1) & \text{if } i_1 = j_1 \text{ and } \min\{C_{Si_2}(t), C_{j_1D}(t)\} \\ & \quad > \min\{C_{Si_1}(t), C_{j_2D}(t)\} \\ (i_1, j_2) & \text{otherwise.} \end{cases}$$

수식에서 보는 바와 같이 링크 전송률을 최대로 하는 최적 송신 및 수신 중계기가 서로 다를 경우에는 최적 송신중계기와 최적 수신중계기가 선택되고, 그렇지 않은 경우에는 두 링크의 최소가 더 큰 조합으로 두번째 최적 중계기와의 조합으로 중계기 쌍이 선택된다.

공간 전이중 최대-최대 중계기 선택 기법은 중계기 간 간섭이 없는 이상적인 환경에서는 거의 이상적인 전이중 전송의 효율을 성취할 수 있지만, 실제로 중계기 수가 증가함에 따라 이는 거의 불가능하기 때문에 간섭으로 인하여 심각한 성능저하가 발생할 수 있다.

2. 버퍼도움 연속 기회주의적 중계전송 기법 (Buffer-Aided Successive Opportunistic Relaying)

공간 전이중 최대-최대 중계기 선택 기법은 중계기 간 간섭을 고려하지 않아서 실제로 간섭이 있는 환경에서는 성능저하가 발생할 수 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 [19][20]에서는 중계기 간 간섭을 고려하고 연속간섭제거 (successive interference cancellation) 기술 기반의 버퍼도움 연속 기회주의적 중계전송 (BA-SOR) 기법이 제안되었다. 이 기법에 의하면 수신중계기는 먼저 간섭신호를 정보이론적으로 복호 (de-coding)하고 복호를 성공하면 중계기 간 간섭채널의 채널상태 정보와 복호된 간섭신호를 이용하여 간섭을 제거하고 원하는 정보를 복호할 수 있다. 따라서 링크의 타켓 요구 전송률을 기반으로 간섭신호를 먼저 수신하고, 성공하면 간섭이 제거된 신호대잡음비 (SNR)로 중계기 선택에 참여하고, 실패하면 간섭이 포함된 신호대간섭및잡음비 (SINR)로 중계기 선택에 참여하게 된다. 이를 수식으로 표현하기 위해서 먼저 송수신 중계기 쌍 에 대한 각 링크의 전송률을 다음과 같이 정의한다.

$$C_{SR_i} = \log_2\left(1 + \frac{|h_{SR_i}|^2 P_{tx}}{|h_{R_jR_i}|^2 P_{tx} + \sigma_n^2}\right),$$

$$C_{R_jD} = \log_2\left(1 + \frac{|h_{R_jD}|^2 P_{tx}}{\sigma_n^2}\right),$$

$$C_{R_jR_i} = \log_2\left(1 + \frac{|h_{R_jR_i}|^2 P_{tx}}{|h_{SR_i}|^2 P_{tx} + \sigma_n^2}\right),$$

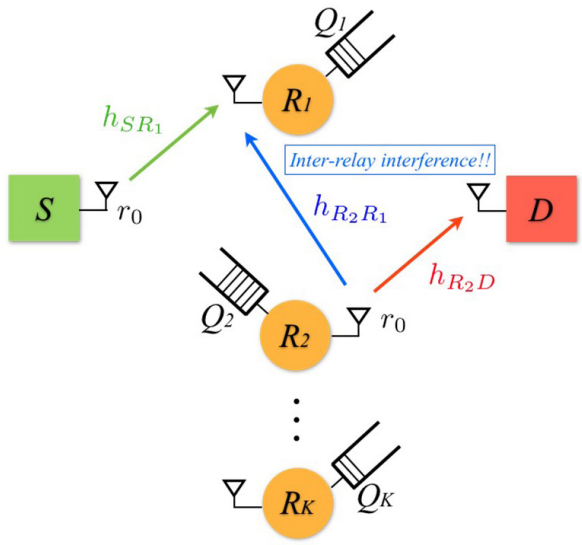

그림 3. 버퍼도움 연속 기회주의적 중계전송 기법 (Buffer-Aided Successive Opportunistic Relaying)

여기서 h_{xy} 는 채널이득, P_{tx} 는 송신전력, σ_n^2 는 잡음량을 나타낸다. 타켓 요구 전송률 r_0 에 대해서 정보이론적으로 간섭신호 복호가 가능하기 위해서는 $(C_{R_jR_i} \geq r_0)$을 만족해야 한다.

최적 송수신 중계기 쌍은 다음으로 결정된다.

$$\max_{j \in \mathrm{T}}\left\{\min\left[\max_{i \in \{1,\cdots,K\}\setminus\{j\}} \frac{|h_{SR_i}|^2}{|h_{R_jR_i}|^2\left(1 - \mathrm{I}(R_jR_i)\right) + \mathrm{I}(R_jR_i)}, |h_{R_jD}|^2\right]\right\}$$

여기서 T 는 중계기 집합 $\{1, \cdots, K\}$ 에서 송신이 불가능한 버퍼가 0인 중계기를 제외한 중계기 집합이고, $\mathrm{I}(R_jR_i) = (C_{R_jR_i} \geq r_0)$ 으로 간섭제거 성공이면 1, 실패이면 0의 값을 돌려주는 지시함수이다. 수식에 의하면 먼저 후보 송신중계기 j 에 대해서 이를 제외한 나머지 중계기를 수신중계기로 하여 간섭제거가 성공하면 SNR로 실패하면 SINR로 적용한 실효 소스노드- 중계노드 전송률과 송신중계기 j 에 대한 중계노드-목적노드 전송률 중 작은 값을 최대로 하는 송신중계기 j 와 수신중계기 i 를 선택하게 된다.

버퍼도움 연속 기회주의적 중계전송 기법은 중계기 간 간섭을 정보이론적으로 제거하고 간섭이 제거된 향상된 링크 전송률을 기반으로 최적 송수신 중계기를 선택적으로 운용한다. 중계기의 수가 증가할수록 간섭제거가 가능한 송수신 중계기 조합의 수가 늘어날 가능성이 커지기 때문에 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만 연속간섭제거가 가능하기 위해서는 근본적으로 정보전송채널과 간섭채널의 신호세기의 차이가 커야한다. 또한, 버퍼도움 연속 기회주의적 중계전송 기법은 고정 전송률을 가정하여 운영되기 때문에 기본적으로 오류율 감소에 효과적인 기법이 된다.

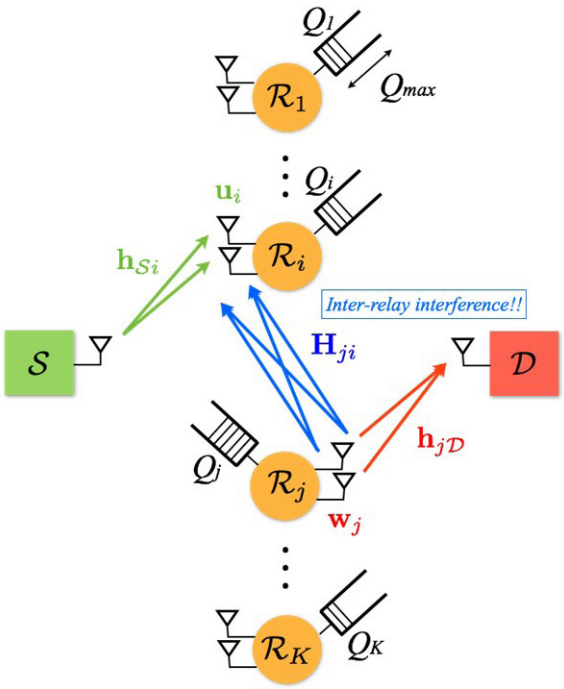

그림 4. 가상 전이중 버퍼도움 중계전송 기법
(Virtual Full-Duplex Buffer-Aided Relaying)

3. 가상 전이중 버퍼도움 중계기 선택 기법 (Virtual Full-Duplex Buffer-Aided Relaying)

버퍼도움 연속 기회주의적 중계전송 기법은 중계기 간 간섭은 고려되었지만, 고정 전송률 전송을 기본으로 하고, 간섭제거가 채널상태와 중계기 수에 의존하기 때문에 항상 좋은 성능을 성취할 수는 없다. 그래서 [21][22]에서는 다중안테나 (MIMO) 기술을 이용하여 간섭을 제거하고 최적 송수신 중계기 선택을 통해 전이중 전송의 성능을 점근적으로 성취하는 가상 전이중 버퍼도움 중계전송 (virtual full-duplex buffer-aided relaying) 기법이 제안되었다.

〈그림 4〉에서 보는 바와 같이 가상 전이중 버퍼도움 중계전송 기법은 버퍼가 장착된 다수 중계기 네트워크에서 각 중계기에 다중안테나를 장착하여 다중안테나 빔포밍 (beamforming) 기술로 송수신 중계기 간 간섭을 제거한다. 즉, 수신중계기의 수신 빔포머 (beamformer)와 송신중계기의 송신 빔포머 (beamformer)를 중계기 간 간섭을 최소화하고, 정보전송채널에 대해서는 전송률을 최대화 하도록 설계한다. 다양한 빔포밍 설계가 가능하기 때문에 [22]에서는 중계기 간 간섭을 0으로 하고, 중계노드-목적노드 실효채널을 최대화하는 zero-forcing (ZF) 빔포밍과 중계노드-목적노드 실효채널을 최적으로 하고 수신중계기에서 에러를 최소화하는 minimum mean square error (MMSE) 빔포밍 방식이 제안되었다. 또한, 이 두가지 방식을 반복적 (iterative)으로 설계하는 최적 (optimal) 빔포밍 기법도 제안되었다. 각각의 송수신 빔포머 수식은 [22]에서 확인할 수 있다.

송수신 빔포머들의 설계가 끝나면 각 링크에서의 실효 전송률 계산이 가능하며, 이러한 실효 전송률을 기반으로 다수 중계기 중에서 최적의 송수신 중계기 쌍을 선택하는 것이 가능하다. 버퍼도움 연속 기회주의적 중계전송 기법을 포함하여 기존 연구들에서는 버퍼가 없는 중계전송 네트워크를 기반으로 가상 전이중 전송에 대해서도 소스노드-수신중계기 전송률과 송신중계기-목적노드 전송률의 최소(minimum)로 최적 중계기 쌍을 선택하였지만, [21][22]에서는 소스노드에서 목적노드로의 평균 단대단 전송률을 최대로 하는 중계기 선택의 목적함수를 랑그랑제 완화 (Lagrange relaxation)을 기반으로 두 링크의 가중치합 (weighted sum)으로 도출하고, 이를 최대화 하는 송수신 중계기 쌍을 선택하는 방안을 제시하고, 그 결과가 옳음을 증명하였다. 이에 의하면 제안된 빔포밍 설계 및 중계기 선택 최적문제는 다음과 같다.

$$\max_{\{\boldsymbol{u}_i,\boldsymbol{w}_j,i,j\}} \quad \alpha_i C_{Si}^{(i,j)} + (1-\alpha_j) C_{jD}^{(i,j)}$$
$$\text{s. t.} \quad \|\boldsymbol{u}_i\| \le 1, \|\boldsymbol{w}_j\| \le 1, \quad i \ne j.$$

여기서 $\boldsymbol{u}_i$ 는 중계기 i 의 수신빔포머, $\boldsymbol{w}_j$ 는 중계기 j 의 송신빔포머, α_i 는 중계기 i 에 대한 가중치, $C_{Si}^{(i,j)}$ 는 중계기 쌍 (i,j) 에 대해서 소스노드-중계기 i 링크의 버퍼상태가 반영된 실효 전송률, $C_{jD}^{(i,j)}$ 는 중계기 쌍 (i,j) 에 대해서 중계기 j-목적노드 링크의 버퍼상태가 반영된 실효 전송률을 나타낸다. 제약조건은 각 비포머의 크기는 1을 넘지 않아야 하고, 송신중계기와 수신중계기는 같을 수 없음을 의미한다. 최적문제 가중치 최적값은 subgradient 최적화 또는 back-pressure 알고리즘에

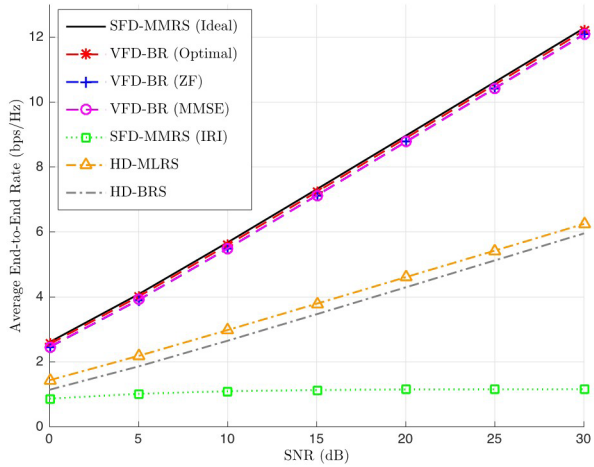

그림 5. 가상 전이중 중계전송 전송률 성능비교
(중계기 수: 3, 안테나 수: 4, 평균 정보채널 이득:평균 간섭채널 이득=1:10)

의해서 구할 수 있음도 [22]에 제안되었다.

제안된 가상 전이중 버퍼도움 중계전송 기법에 의하면 먼저 모든 가능한 조합에 대한 비포머 값을 정하면, 각 링크의 전송률이 구해지고, 이 링크 전송률을 back-pressure 알고리즘으로 구해진 최적가중치 값으로 가중치 합을 구하고, 이 값을 최대로 하는 송수신 중계기 쌍을 선택하면 최적 빔포밍 설계 및 중계기 선택 문제의 해를 구할 수 있다.

공간 전이중 최대-최대 중계기 선택 (SFD-MMRS) 기법은 중계기 간 간섭이 없는 이상적인 환경에서 제안되었고, 버퍼도움 연속 기회주의적 중계전송 (BA-SOR) 기법은 채널상태정보가 수신기에만 존재하는 고정 전송률 전송에서 오류율을 낮추기 위해서 제안되었다. 마지막으로 가상 전이중 버퍼도움 중계전송 (VFD-BR) 기법은 송신기에서도 채널상태정보가 가능하여 전송률을 조절할 수 있는 상황에서 평균 전송률을 최대로 하도록 제안되었다.

전송률 관점에서 살펴보기 위해서 공간 전이중 최대-최대 중계기 선택 기법과 가상 전이중 버퍼도움 중계전송 기법의 성능을 비교해보면 〈그림 5〉와 같다. 중계기 수 3개, 중계기의 안테나 수 4개, 중계기 간의 거리가 상대적으로 가깝다고 가정하여 중계기 간 간섭채널이 평균적으로 다른 정보채널들보다 10배 더 강하게 설정되었다. 이상적인 간섭이 없는 환경에서 공간 전이중 최대-최대 중계기 선택 (SFD-MMRS (ideal)) 기법은 전이중 (full-duplex) 전송의 성능을 보여주고, 3가지 다른 빔포밍 설계가 적용된 가상 전이중 버퍼도움 중계전송 (VFD-BR) 기법은 이러한 이상적인 전이중 전송의 성능을 거의 성취함을 볼 수 있다. 하지만 중계기 간 간섭이 적용되면 공간 전이중 최대-최대 중계기 선택 (SFD-MMRS) 기법의 성능은 심각하게 나빠져서 반이중 (half-duplex) 중계전송 선택 기법들 보다도 성능이 좋지 못한 것을 확인할 수 있다. 비교된 반이중 중계전송 기법은 버퍼가 없는 경우 최적 중계기 선택 (best relay selection) 기법인 최대-최소 (max-min) 중계기 선택 기법 (HD-BRS)과 버퍼의 도움으로 오류율 관점에서 최대 다이버시티 (diversity)를 성취하는 최대-링크 (max-link) 중계기 선택 기법 (HD-MLRS) 이다. 최종적으로 가상 전이중 중계전송 기법은 반이중 중계전송 기법이 성취하는 전송률의 거의 2배를 성취함을 확인할 수 있다. 그리고 이러한 성능은 중계기의 수와 안테나의 수가 증가하면 더욱 향상되게 된다.

Ⅳ. 결 론

본고에서는 5세대 이동통신 핵심기술 중 하나인 전이중 (full-duplex) 전송을 모사할 수 있는 차세대 가상 전이중 (virtual full-duplex) 중계전송 기법에 대해서 알아보았다. 전이중 중계노드의 구현이 아직은 시기상조이기에 가상 전이중 중계전송에서는 2개의 중계기가 하나의 가상 중계기로서 송신과 수신을 동시에 수행하여 전이중 중계전송의 성능에 근접하도록 한다. 2개의 중계기가 번갈아 가면서 송신과 수신 역할을 하는 2경로 교차 (two-path alternating) 중계전송 기법들이 제안되었고, 중계기에 버퍼를 장착하여 선택 다이버시티를 향상하는 가상 전이중 버퍼도움 중계전송 기법들이 제안되었다. 제안된 기법은 중계기 수, 안테나 수에 따라서 점근적으로 이상적인 전이중 전송의 성능을 성취할 수 있어서 반이중 중계전송의 제약으로 인한 전송률 손실을 극복하는 유망한 중계전송 기술로 평가되고, 차세대 중계전송 기술 연구의 좋은 발전 방향이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan, and R. Wichman, "In-band full-duplex wireless: challenges and opportunities," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 32, no. 9, pp. 1637-1652, Sep. 2014.

[2] G. Liu, F. R. Yu, H. Ji, V. C. M. Leung, and X. Li, "In-band full-duplex relaying: A survey, research issues and challenges," IEEE Commun. Surveys and Tutorials, vol. 17, no. 2, pp. 500-524, Feb. 2015.

[3] Z. Zhang, K. Long, A. V. Vasilakos, and L. Hanzo, "Full-duplex wireless communications: challenges, solutions, and future research directions," Proceedings of the IEEE, 2016. (To appear)

[4] M. Jain, J. I. Choi, T. M. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "Practical, real-time, full duplexing wireless," in Proc. ACM Mobile Computing and Networking (MobiCom), Sep. 2011.

[5] M. Duarte, A. Sabharwal, V. Aggarwal, R. Jana, K. Ramakrishnan, C. Rice, and N. Shankaranarayanan, "Design and characterization of a full-duplex multiantenna system for WiFi networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 63, no. 3, pp. 1160-1177, Mar. 2014.

[6] D. Bharadia, K. Joshi, and S. Katti, "Robust full duplex radio link," in Proc. ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM), Aug. 2014.

[7] M. Chung, M. S. Sim, J. Kim, D. K. Kim, and C.-B. Chae, "Prototyping real-time full duplex radios," IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 9, pp. 56-63, Sep. 2015.

[8] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," IEEE J. Sel. Aeas Commun., Vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007.

[9] Y. Fan, C. Wang, J. Thompson, and H. V. Poor, "Recovering multiplexing loss through successive relaying using repetition coding," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 6, no. 12, pp. 4484-4493, Dec. 2007.

[10] S. S. C. Rezaei, S. O. Gharan, and A. K. Khandani, "Relay scheduling in the half-duplex Gaussian parallel relay channel," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 56, no. 6, pp. 2668-2687, June 2010.

[11] S. H. Kim, T. V. K. Chaitanya, T. Le-Ngoc, and J. Kim, "Rate maximization based power allocation and relay selection with IRI consideration for two-path AF relaying," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 14, no. 11, Nov. 2015.

[12] D. S. Michalopoulos and G. K. Karagiannidis, "Bypassing orthogonal relaying transmissions via spatial signal separation," IEEE Trans. Commun., vol. 58, no. 10, pp. 3028-3038, Oct. 2010.

[13] C. Wang, Y. Fan, J. Thompson, M. Skoglund, and H. V. Poor, "Approaching the optimal diversity-multiplexing tradeoff in a four-node cooperative network," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 9, no. 12, pp. 3690-3700, Dec. 2010.

[14] R. Tannious and A. Nosratinia, "Spectrally-efficient relay selection with limited feedback," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 26, no. 8, pp. 1419-1428, Oct. 2008.

[15] Y. Hu, K. H. Li, and K. C. Teh, "An efficient successive relaying protocol for multiple-relay cooperative networks," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 11, no. 5, pp. 1892-1899, May 2012.

[16] Y.-b. Kim, W. Choi, B. C. Jung, and A. Nosratinia, "A dynamic paradigm for spectrally efficient half-duplex multi-antenna relaying," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 12, no. 9, pp. 4680-4691, Sep. 2013.

[17] N. Zlatanov, A. Ikhlef, T. Islam, and R. Schober, "Buffer-aided cooperative communications: Opportunities and challenges," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 4, pp. 146-153, Apr. 2014.

[18] A. Ikhlef, J. Kim, and R. Schober, "Mimicking full-duplex relaying using half-duplex relays with buffers," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 61, no. 7, pp. 3025-3037, Sep. 2012.

[19] N. Nomikos, T. Charalambous, I. Krikidis, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas, and M. Johansson, "A buffer-aided successive opportunistic relay selection scheme with inter-relay interference cancellation," in Proc. IEEE PIMRC, Sep. 2013.

[20] N. Nomikos, D. Vouyioukas, T. Charalambous, I. Krikidis, P. Makris, D. N. Skoutas, M. Johansson, and C. Skianis, "Joint relay-pair selection for buffer-aided successive opportunistic relaying," Trans. Emerging Tel. Tech., Nov. 2013.

[21] S. M. Kim and M. Bengtsson, "Virtual full-duplex buffer-aided relaying - relay selection and beamforming," in Proc. IEEE PIMRC, Sep. 2013.

[22] S. M. Kim and M. Bengtsson, "Virtual full-duplex buffer-aided relaying in the presence of inter-relay interference," IEEE Trans. Wirel. Commun., 2016. (To appear)

[23] METIS Consortium, D3.3 - Final performance results and consolidated view on the most promising multi-node/multi-antenna transmission technologies, ICT-317669-METIS/D3.3, Feb. 2015.

약 력

정 방 철

2002년 아주대학교 공학사
2004년 KAIST 공학석사
2008년 KAIST 공학박사
2008년~2009년 KAIST IT융합연구소 연수연구원
2009년~2010년 KAIST IT융합연구소 연구조교수
2010년~2014년 국립경상대학교 정보통신공학과 조교수
2014년~2015년 국립경상대학교 정보통신공학과 부교수
2010년~현재 KAIST IT융합연구소 겸직교수
2015년~현재 국립충남대학교 전자공학과 부교수
관심분야: 5세대 이동통신, 통계적 신호처리, 정보이론

김 수 민

2005년 인하대학교 공학사
2007년 KAIST 공학석사
2012년 KAIST 공학박사
2012년 KAIST 정보전자연구소 박사후연구원
2012년 국립경상대학교 해양과학대학 해양산업연구소 선임연구원
2012년~2014년 스웨덴 왕립공과대학교 전기전자공학부 박사후연구원
2014년~2015년 스웨덴 에릭슨연구소 Experienced Researcher
2015년~현재 한국산업기술대학교 전자공학부 조교수
관심분야: 차세대 이동통신 시스템, 무선자원관리, 무선간섭관리, 협력 버퍼도움 중계전송, 기계타입통신, 인지통신, 통계적 신호처리