

차세대 버퍼도움 중계전송 기법

김수민

한국산업기술대학교

요약

본고에서는 5세대 이동통신 시스템의 유망기술 중 하나인 차세대 버퍼도움 (buffer-aided) 중계전송 기법의 핵심개념과 최신연구 동향에 대해서 알아본다. 먼저, 3개 노드로 구성되는 기본 중계기 네트워크에서 버퍼도움 중계전송의 원리와 관련 연구결과들을 살펴본다. 다음으로 다수 노드로 구성되는 다중 중계기 네트워크에서 기존 중계기 선택전송 기법 및 최신 버퍼도움 중계기 선택전송 기법에 대해서 비교하여 살펴본다. 마지막으로 차세대 버퍼도움 중계전송 기법이 다양한 환경에 적용한 응용 연구에 대해 살펴보고 본고를 마친다.

I. 서론

4세대 이후 이동통신 시스템의 핵심기술 중 하나인 중계전송 기법은 음영지역 해소, 통신 가능영역 (coverage) 확대 등이 주요 목적이었다. 하지만 중계기는 기본적으로 수신받은 정보를 다시 송신해 주어야만 소스노드에서 목적노드로 정보 전송이 완료되기 때문에 근본적으로 단대단 통신관점에서는 전송률을 1/2로 떨어뜨리게 된다.

이러한 한계점은 송신과 수신을 동시에 수행할 수 없는 중계기의 반이중 (half-duplex) 전송특성 때문이다. 따라서 이를 근본적으로 해결하는 전이중 (full-duplex) 전송방법에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다[1][2][3]. 하지만 전이중 전송은 중계기에서 송신과 동시에 수신을 하기 때문에 엄청난 자기 간섭 (self-interference)을 경험하게 된다. 이를 해결하기 위해 기존 연구에서는 안테나 분리, 하드웨어적 간섭제거, 디지털 간섭제거 등의 기술들을 모두 결합하여 간섭량을 줄이는 노력을 해왔다. 그 결과, [1][2][3]에서는 WiFi, ZigBee와 같은 통신프로토콜을 이용하여 특수한 환경에서 전이중 (full-duplex) 전송 구현 가능성이 열려있음을 보였다. 그러나 비록 가능성은 열려 있지만, 폭넓은 무선대역폭, 하드웨어 소자의 불완전성 등

의 한계로 인하여 실제적인 이동통신 시스템에 적용하여 구현하는 것은 아직 시기상조이다. 따라서 반이중 (half-duplex) 중계 전송을 유지하면서도 손실된 전송률을 높이고, 다이버시티 (diversity) 이득을 높여 오류율을 줄이는 연구들이 수행되어 왔다. 최근에 유망있는 기술로서 중계기에 수신데이터를 저장할 수 있는 메모리를 장착하고, 이를 전송에 이용하는 버퍼도움 중계전송 기법이 제안되었다[4].

기존의 신호증폭기 (repeater)와 달리 중계기는 연산/처리 능력을 지니기 때문에 버퍼를 장착하는 것은 어찌보면 당연한 일이다. 하지만 이전에는 이 버퍼를 성능향상에 활용하지는 못하였다. 버퍼는 중계기가 수신한 데이터를 바로 중계하지 않고, 무선채널 상황이 좋을 때 기회주의적 (opportunistic)으로 전송하도록 함으로써 성능향상에 크게 기여할 수 있다. 먼저, 중계기가 하나 존재하는 가장 간단한 중계 네트워크인 3노드 네트워크에서 버퍼의 활용이 반이중 (half-duplex) 중계 손실을 회복할 수 있도록 하는 버퍼도움 중계전송 기법들이 제안되었다 [5]-[8]. 그리고 네트워크 코딩 기법을 이용하여 전체 중계 네트워크의 효율을 향상시킬 수 있는 3노드 양방향 (two-way) 중계 네트워크에서도 버퍼에 의한 성능향상을 성취하는 중계전송 기법에 대한 연구들이 진행되었다[9][10][11].

중계기가 다수 개로 늘어나면 기회주의적인 중계기 선택 이득이 생겨서 중계 네트워크의 전송률 증가, 오류율 감소 등의 획기적인 성능 향상을 가져올 수 있음은 익히 잘 알려진 사실이다[12]. 따라서 버퍼도움 중계전송 연구에서도 다수의 중계기 환경으로 확장하여 중계기 선택 다이버시티 (diversity) 이득을 취하는 버퍼도움 중계기 선택전송 기법들이 제안되었고[13][14], 기존의 버퍼가 고려되지 않은 최적 중계기 선택전송 기법 [12]과 비교하여 평가되었다.

버퍼도움 중계전송 기법의 전송률 증가, 오류율 감소 측면에서의 성능이득은 여러 연구들을 통해서 다각적으로 평가되었고, 최근에는 연구결과를 확장하여 차세대 통신 환경으로 평가받는 인지통신 (cognitive radio) 환경에 적용한 연구들[15]-[19]과 물리계층보안 (physical-layer security) 환경에 적용한 연구들[20][21][22]도 진행되고 있다. 본고에서는 이러한 버퍼

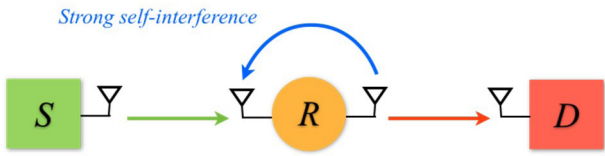


그림 1. 전이중 (full-duplex) 중계전송

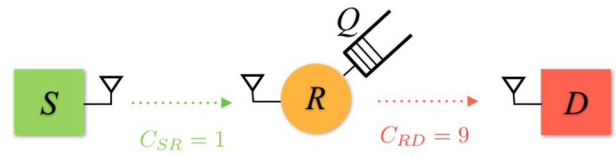


그림 3. 버퍼도움 중계전송의 이득성취 원리 예시

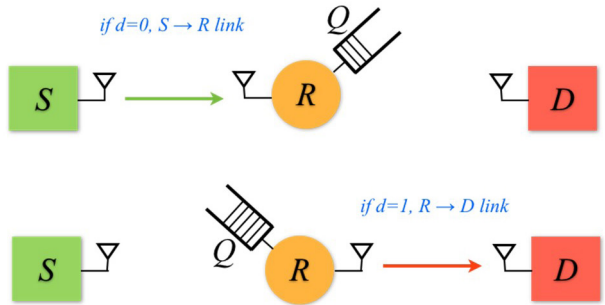


그림 2. 반이중 (half-duplex) 버퍼도움 중계전송

도움 중계전송 기법의 응용 연구에 대해서도 간단히 소개하고자 한다.

본고의 이후에서는 II장에서 가장 간단한 3노드 네트워크에서 버퍼도움 중계전송 기법의 기본 개념과 성능향상점을 살펴보고, III장에서 중계기 수를 늘린 다수 중계기 네트워크에서 제안된 버퍼도움 중계기 선택전송 기법들을 비교하여 소개한다. IV장에서는 차세대 인지통신 및 물리계층보안에 적용된 버퍼도움 중계전송 기법의 응용에 대해서 살펴보고, V장에서 본고의 결론을 맺는다.

II. 3노드 네트워크에서 버퍼도움 중계전송 기법

본 장에서는 소스노드, 중계노드, 목적노드의 3개의 노드로 구성된 가장 간단한 중계 네트워크인 3노드 네트워크 환경을 고려하여 버퍼도움 중계전송의 개념과 이득이 발생하는 원리를 설명하고, 제안되어 있는 기법을 소개한다.

〈그림 1〉에서 보는바와 같이 전이중 (full-duplex) 중계전송은 하나의 중계기에서 송수신을 함께 수행하기 때문에 중계기 자신이 송신한 신호가 자신의 수신 안테나로 함께 수신되어 심각한 자기간섭 (self-interference)를 유발하게 된다. 이러한 전이중 중계전송은 실제 구현에 여러 난관이 존재하여 여전히 반이중 (half-duplex) 중계전송이 일반적으로 실제적인 기술로 고려된다.

〈그림 2〉는 버퍼가 고려된 3노드 네트워크에서 반이중 버퍼도움 중계전송 (buffer-aided relaying)을 나타낸다. 기존 반이중 중계 전송에서는 홀수 시간슬롯에서는 소스노드-중계기 (S-R) 전송을 수행하고, 짝수 시간슬롯에서는 홀수 시간슬롯에서 수신한 데이터를 목적노드로 포워딩하는 중계기-목적노드 (R-D) 전송이 수행되는 2위상 (two phase) 동작이 이루어졌다. 하지만 중계기에 데이터를 저장할 수 있는 버퍼가 존재하면 수신한 데이터를 다음 시간슬롯에서 전송할 필요가 없어져서 R-D 채널상황이 좋아질 때까지 기다렸다가 전송하는 것이 가능해진다. [6][7][8]에서는 링크선택 변수 (d)를 추가하여 채널상태정보 (channel state information)와 버퍼상태정보 (buffer state information)를 기반으로 S-R 링크와 R-D 링크 중 전송률을 최대로 하는 최적의 링크를 선택하는 적응적 링크선택 (adaptive link selection) 기법이 제안되었다. 제안 기법에 의하면 S-R 링크와 R-D 링크의 평균 채널상태가 상당히 불균형한 환경에서는 전이중 중계전송의 성능인 기존 2위상 반이중 중계전송률의 거의 2배를 성취할 수 있음이 밝혀졌다.

〈그림 3〉은 평균 채널상태가 불균형한 환경에서 버퍼도움 중계전송의 이득성취 원리에 대한 예시를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 S-R 링크 채널용량보다 R-D 링크 채널용량이 9 배 크다면, 버퍼가 없는 기존 중계전송에서는 두 링크 채널용량의 최소인 S-R 링크의 채널용량에 맞추어 전송이 일어난다. 따라서 10 시간슬롯동안 전송한다고 가정하였을 때, 전송량은 $\frac{1}{2} \min(1, 9) \times 10 = 5$ 가 된다. 반면에 버퍼가 장착된 버퍼도움 중계전송에서는 S-R 전송을 9번 수행하면서 버퍼에 저장하고, R-D 전송을 1번 수행하여 목적노드로 버퍼의 데이터를 전송하는 것이 가능하기 때문에 10시간슬롯동안 전송한다고 가정하였을 때, 전송량은 $\min(1 \times 9, 9 \times 1) = 9$ 가 된다. S-R 링크와 R-D 링크의 평균 채널상태의 불균형이 더 커지면 버퍼도움 중계전송은 기존 중계전송의 전송률의 2배를 전송할 수 있게 되어 전이중 중계전송의 성능을 성취할 수 있게 된다. 하지만 불균형이 커지게 되면 기본적으로 단대단으로 성취할 수 있는 평균 전송률은 좋지 않은 채널에 맞추어져서 절대적인 성능은 그리 높지 않아서 실효성은 떨어질 수 있다.

Ⅲ. 다수 중계기 네트워크에서 버퍼도움 중계기 선택전송 기법

본 장에서는 중계기의 수를 다수 개로 늘어난 다수 중계기 네트워크에서 버퍼도움 중계전송 기법에 관하여 살펴본다. 소스 노드와 목적노드는 하나씩이고, 중계기만 다수 개로 늘어나기 때문에 다수 중계기 네트워크에서는 전송 시점에서 최적의 중계기 하나를 선택하여 운용하면 선택 다이버시티 (selection diversity) 이득으로 중계기 수가 증가함에 따라 전송률과 오류율 관점에서 중계 네트워크의 성능을 높일 수 있다.

먼저, 버퍼가 장착되지 않은 다수 중계기 네트워크에서 최적의 중계기 선택 방법인 최대-최소 (max-min) 중계기 선택 기법[12]을 살펴보고, 버퍼를 고려하여 성능 향상을 성취하는 최대-최대 (max-max) 중계기 선택 기법[13]과 최대-링크 (max-link) 중계기 선택 기법[14]에 대해서 살펴본다.

1. 최대-최소 (max-min) 중계기 선택 기법

버퍼가 장착되지 않은 경우에는 2위상 (two phase) 동작에 의해서 홀수 시간슬롯에서는 S-R 전송이 이루어지고, 짝수 시간슬롯에서는 R-D 전송이 이루어져 수신한 데이터를 목적노드로 포워딩하게 된다. 따라서 중계기 별로 S-R 링크 용량과 S-R 링크 용량의 최소가 소스노드에서 목적노드로의 전송 가능한 전송률이 되고, 이 값을 최대로 하는 중계기를 선택하는 것이 최적 중계기 선택 방법이 된다[12]. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$k^* = \operatorname{argmax}_{k \in \{1, \dots, K\}} \min\{C_{Sk}, C_{kD}\},$$

여기서 K 는 중계기 수, $C_{Sk} = \frac{1}{2} \log(1 + SNR_{Sk})$, $C_{kD} = \frac{1}{2} \log(1 + SNR_{kD})$, SNR_{xy} 는 $x-y$ 링크의 수신 신호대잡음비(signal-to-noise-ratio)이다.

2. 최대-최대 (max-max) 버퍼도움 중계기 선택 기법

앞 장에서 설명했듯이 중계기에 버퍼가 사용가능해지면 채널 상태와 버퍼상태에 따라 최적의 중계기가 달라지게 된다. [13]에서는 2위상 동작을 유지한채로 최적의 버퍼도움 중계기 선택 기법이 제안되었다. 즉, 홀수 시간슬롯에서는 S-R 링크 전송이 이뤄지고, 짝수 시간슬롯에서는 R-D 링크 전송이 이루어지는 제약을 두고 최적의 중계기를 선택하였다. 하지만 버퍼가 장착되면 R-D 링크 전송 시, 버퍼에 저장되어 있는 데이터를 전송하면 되기 때문에 반드시 이전 시간슬롯에서 S-R 링크 전송에 선택되었던 중계기가 선택될 필요가 없어진다. 따라서 S-R 링크와 R-D

링크 전송에 대해서 각각 독립적인 중계기 선택이 가능해진다. [13]에서는 S-R 링크에 대해서 채널이득이 최대인 수신 중계기를 선택하고, R-D 링크에 대해서 채널이득이 최대인 송신 중계기를 선택하는 최대-최대 (max-max) 중계기 선택 기법이 제안되었다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$i^* = \operatorname{argmax}_{i \in \{1, \dots, K\}} \{C_{Si}\}, \quad j^* = \operatorname{argmax}_{j \in \{1, \dots, K\}} \{C_{jD}\},$$

여기서 i^* 는 홀수 시간슬롯에 소스노드로부터 데이터를 수신하는 최적 수신 중계기 인덱스이고, j^* 는 짝수 시간슬롯에 목적노드로 버퍼의 데이터를 송신하는 최적 송신 중계기 인덱스이고, $C_{Si} = \frac{1}{2} \log(1 + SNR_{Si})$ 이고, $C_{jD} = \frac{1}{2} \log(1 + SNR_{jD})$ 이다.

3. 하이브리드 (hybrid) 버퍼도움 중계기 선택 기법

최대-최대 (max-max) 중계기 선택 기법은 무한대의 버퍼길이와 초기화 기간으로 충분히 긴 초기 버퍼길이를 가정하여 중계기 선택에 있어서는 채널상태만 고려되고, 버퍼상태는 고려되지 않았다. 하지만 실제로 버퍼길이는 유한하기 때문에 (i) 선택된 수신 중계기의 버퍼가 가득차 (full) 있거나 (ii) 선택된 송신 중계기의 버퍼가 비어 (empty) 있으면 선택이 되더라도 실제 전송이 일어날 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 (i)과 (ii)의 경우에는 최대-최소 (max-min) 중계기 선택 기법에 의해 전송되도록 하는 하이브리드 (hybrid) 버퍼도움 중계기 선택 기법도 제안이 되었다 [13]. 이를 수식으로 표현하면 최적 송신중계기 i^* 와 최적 수신중계기 j^* 는 다음과 같이 결정된다.

$$i^* = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{i \in \{1, \dots, K\}} \min\{C_{Si}, C_{iD}\}, & \text{if } Q_i = Q_{\max} - 1 \text{ or } Q_j = 0, \\ \operatorname{argmax}_{i \in \{1, \dots, K\}} \{C_{Si}\}, & \text{Otherwise,} \end{cases}$$

$$j^* = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{j \in \{1, \dots, K\}} \min\{C_{Sj}, C_{jD}\}, & \text{if } Q_i = Q_{\max} - 1 \text{ or } Q_j = 0, \\ \operatorname{argmax}_{j \in \{1, \dots, K\}} \{C_{jD}\}, & \text{Otherwise,} \end{cases}$$

여기서 K 는 중계기 수, Q_{\max} 는 버퍼의 최대길이, Q_i 는 중계기 i 의 선택 시점에서 버퍼길이이고, 해당 중계기의 버퍼는 성공적인 송수신 이후에 전송량만큼 업데이트된다. 하이브리드 (hybrid) 중계기 선택 기법은 최대-최소 (max-min) 중계기 선택 기법과 최대-최대 (max-max) 중계기 선택 기법의 하이브리드 모드이기 때문에 항상 이들보다 좋은 성능을 성취할 수 있다.

4. 최대-링크 (max-link) 버퍼도움 중계기 선택 기법

최대-최대 (max-max) 중계기 선택 기법과 하이브리드

(hybrid) 중계기 선택 기법은 버퍼 이득으로부터 성능을 향상시킬 수 있지만, 2위상 (two phase) 동작으로 인하여 중계기 선택에 있어서 자유도 면에서는 최대를 성취할 수 없다. 즉, 전체 $2K$ 개의 링크가 존재하지만, 홀수 시간슬롯에서는 S-R 링크 전송만 이루어져서 K 개의 중계기 중 최적의 수신중계기를 선택하게 되고, 짝수 시간슬롯에서는 R-D 링크 전송만 이루어져서 마찬가지로 K 개의 중계기 중 최적의 송신중계기를 선택하게 된다. 이러한 점을 개선하기 위해서 버퍼의 이점을 활용하여 2 위상 (two phase) 동작이라는 제약을 제거하고 매 시간슬롯에서 전체 $2K$ 개의 링크 중 최적의 링크와 그때의 최적의 중계기를 선택하는 최대-링크 (max-link) 버퍼도움 중계기 선택 기법이 제안되었다[14]. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$k^* = \operatorname{argmax}_{k \in \{1, \dots, K\}} \left\{ \bigcup_{Q_k \neq Q_{\max}} \{C_{S_k}\}, \bigcup_{Q_k \neq 0} \{C_{D_k}\} \right\}$$

여기서 K 는 중계기 수, $C_{S_k} = \frac{1}{2} \log(1 + \text{SNR}_{S_k})$, $C_{D_k} = \frac{1}{2} \log(1 + \text{SNR}_{D_k})$, Q_{\max} 는 버퍼의 최대길이, Q_k 는 중계기 k 의 선택 시점에서 버퍼길이이다. 수식에 의하면 버퍼가 가득찬 중계기는 수신 중계기 선택에서 제외되고, 버퍼가 빈 중계기는 송신 중계기 선택에서 제외된다. 최대-최대 (max-max) 중계기 선택 기법에서 가정했던대로 최대 버퍼 사이즈가 충분히 크고, 버퍼의 길이가 충분히 길도록 초기화되어 있다면, 최대-링크 (max-link) 중계기 선택 기법은 최대 다이버시티 (diversity) 이득인 $2K$ 를 성취할 수 있다. 따라서 오류율 (outage probability) 관점에서 최적의 기법이라 할 수 있다.

(그림 4)는 소개한 4가지 중계기 선택 기법들의 성능을 오류율 관점에서 비교한 것이다. 시뮬레이션 파라미터는 중계기 수 $K = 3$, 최대 버퍼사이즈 $Q_{\max} \rightarrow \infty$, 고정 타겟 전송률 $r_0 = 1 \text{ bps/Hz}$ 로 설정되었다. 최대-최소 (max-min) 중계기 선택 기법이 가장 높은 오류율을 보이고, 최대-최대 (max-max) 버퍼도움 중계기 선택 기법과 하이브리드 (hybrid) 중계기 선택 기법은 최대-최소 중계기 선택 기법보다 약 2dB 정도의 성능향상을 보인다. 충분히 큰 버퍼 사이즈 설정으로 인하여 최대-최대 버퍼도움 중계기 선택 기법과 하이브리드 중계기 선택 기법은 동일한 성능을 갖는다. 하지만 오류율의 기울기는 최대-최소 중계기 선택 기법과 동일하여 다이버시티 수준 (diversity order)는 증가시키지 못함을 알 수 있다. 반면에 최대-링크 (max-link) 버퍼도움 중계기 선택 기법은 오류율을 크게 감소시킬 뿐만 아니라 기울기도 2배로 증가시켜 다이버시티 단위를 2배로 향상시킴을 보여준다. 이는 최대-링크 버퍼도움 중계기가 최대 다이버시티 수준인 $2K$ 를 성취함을 확인시켜

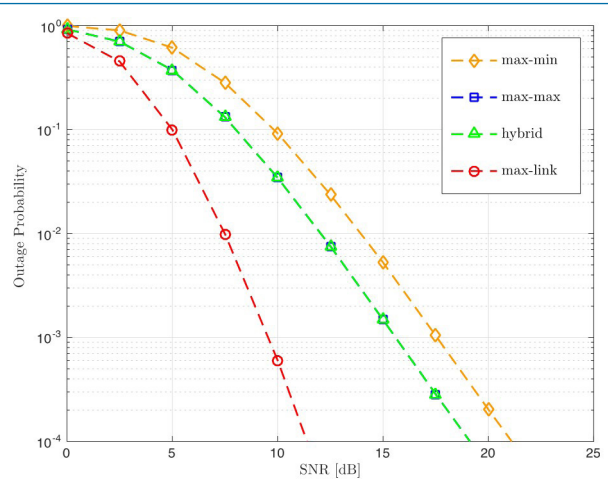


그림 4. 버퍼도움 중계기 선택 기법들의 오류율 ($K = 3, Q_{\max} \rightarrow \infty, r_0 = 1 \text{ bps/Hz}$)

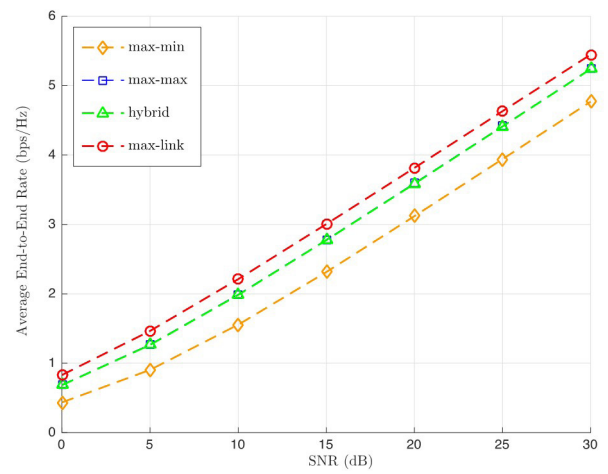


그림 5. 버퍼도움 중계기 선택 기법들의 전송률 ($K = 3, Q_{\max} \rightarrow \infty$)

주는 결과이다.

(그림 5)는 소개한 4가지 중계기 선택 기법들이 성취 가능한 전송률을 비교한 것이다. 시뮬레이션 파라미터는 중계기 수 $K = 3$, 최대 버퍼사이즈 $Q_{\max} \rightarrow \infty$ 이다. 오류율 시뮬레이션에서는 수신기에서만 채널정보가 있다고 가정하여 고정 전송률 $r_0 = 1 \text{ bps/Hz}$ 로 전송된 패킷들에 대한 오류율을 판정한 반면, 전송률 시뮬레이션에서는 송신기에서도 채널정보가 있다고 가정하여 소스노드 혹은 송신 중계기에서 채널정보에 맞추어 전송률이 결정되어 전송되고 수신기에서는 에러없이 복호되는 것으로 간주한다. 예상대로 최대-최소 (max-min) 중계기 선택 기법이 가장 낮은 단대단 평균 전송률을 성취하고, 최대-최대 (max-max) 버퍼도움 중계기 선택 기법과 하이브리드 (hybrid) 중계기 선택 기법은 충분히 큰 최대 버퍼사이즈를 가정하여 동일한 성능으로 전송률을 향상시킨다. 4가지 중계기 선택 기법 중에서 최대-링크 (max-link) 버퍼도움 중계

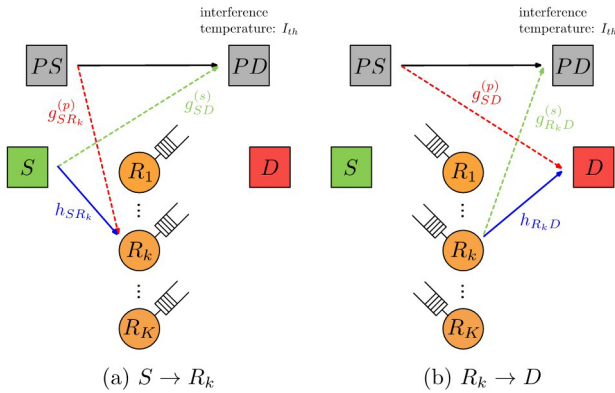


그림 6. 인지통신 환경에서 버퍼도움 중계전송 시스템모델

기 선택 기법은 최대 평균 전송률을 성취한다. 하지만 오류율 성능과는 달리 2배의 전송률을 성취하지는 못한다.

IV. 버퍼도움 중계전송 기법의 응용 연구

버퍼도움 중계전송 기법은 기존 중계기에 버퍼를 채용하여 메모리에 의한 선택 다이버시티 이득을 얻기 때문에 기존 중계전송이 가능한 연구분야에 적용이 가능하다. 본 장에서는 그 중에서 차세대 통신 네트워크로 고려되어 많은 연구들이 진행되고 있는 인지통신 (cognitive radio)과 물리계층보안 (physical layer security)에 초점을 맞추어 버퍼도움 중계전송 기법이 응용된 연구들에 대해서 살펴본다.

1. 인지통신 응용

인지통신 (cognitive radio)은 값비싸고 부족한 주파수 자원을 공유해서 사용하도록 함으로써 자원의 사용 효율성을 높여주는 차세대 통신 네트워크 방식이다. 기본적으로 주파수 자원의 사용권한(license)을 가진 1차시스템 (primary system)과 사용권한은 없지만 1차시스템의 허용에 의해 주파수 자원을 빌려서 사용하는 2차시스템 (secondary system)으로 구성된다. 2차시스템이 주파수 자원을 어떻게 공유해서 사용하느냐에 따라 오버레이 (overlay), 짜집기 (interweave), 언더레이 (underlay) 방식이 존재한다. 연구에 따라서는 짜집기 방식도 오버레이 방식으로 분류되기도 한다. 인지통신은 주파수 자원을 공유해서 사용함에 따라 발생하는 간섭을 어떻게 관리하느냐가 관건이기 때문에 기존의 중계전송에 제약조건을 추가하여 연구가 진행되었다. 버퍼도움 중계전송은 기존 중계전송에 중계기 버퍼를 추가하여 이득을 성취하는 것이기에 인지통신에도 자연스럽게 응용이 가능하다.

〈그림 6〉은 언더레이 (underlay) 인지통신 환경에 적용된 버퍼도움 중계전송의 기본 시스템모델을 보여준다. 2차 시스템은 다수 버퍼도움 중계기 네트워크로 구성되고, 1차시스템 소스노드로부터 간섭을 받고, 1차시스템 목적노드에 간섭을 주게 된다. 이 때, 2차시스템의 송신노드는 1차시스템 수신노드에 미치는 간섭량을 요구되는 간섭량 (interference temperature) 이하로 맞추기 위해서 파워조절 (power control)을 하게 된다. 따라서 인지통신 환경에 적용된 버퍼도움 중계전송에서는 채널상태, 버퍼상태, 파워조절을 고려하여 최적의 링크 혹은 중계기를 선택하는 것이 주요 쟁점이 된다.

인지통신 환경에 적용된 버퍼도움 중계전송 기법 중에서 [15]에서는 2차시스템으로서 중계기가 하나인 3노드 중계전송 네트워크를 고려하여 1차시스템에 미치는 간섭량을 고려한 적응적 링크선택 (adaptive link selection) 기법이 제안되었고, [16]에서는 최대-링크 (max-link) 버퍼도움 중계기 선택 기법을 인지통신 환경에 적용하여 1차시스템에 미치는 간섭량을 고려하여 신호대간섭비 (signal-to-interference-ratio) 기반으로 최적 중계기를 선택하는 최대-비율 (max-ratio) 버퍼도움 중계기 선택 기법이 제안되었다. 인지통신 양방향 중계 네트워크에서 적응적 링크 선택 기법[17]과 오버레이 (overlay) 인지통신 환경에서 공유된 버퍼도움 중계기에 대해서 적응적 링크 선택 기법[18]도 제안되었다. [19]에서는 1차시스템이 항상 활성화 (active) 상태가 아니기 때문에 언더레이 (underlay) 인지통신 환경에서도 2차시스템에 1차시스템의 활성도를 알 수 있는 센싱기능을 추가하여 2차시스템의 성능을 향상시키는 버퍼도움 중계기 선택 기법이 제안되었다.

2. 물리계층보안 응용

물리계층보안 (physical layer security)는 무선채널에서 제공가능한 물리계층 전송률을 고려하여 정보이론적으로 물리계층에서 도청 노드 (eavesdropper)가 엿듣는 것을 어렵게 하는 보안기술이다. 이론적으로 물리계층에서 원천적으로 도청을 막는 기술이기에 최근 정보이론 분야에서 각광을 받으며 많은 연구들이 진행되고 있다. 기본 원리는 도청노드가 수신하는 전송률보다 높은 전송률로 송신노드가 타겟 수신노드로 전송하도록 함으로써 도청노드가 엿듣는다고 하더라도 정보를 정상적으로 복호하는 것을 이론적으로 불가능하게 하는 것이다.

물리계층보안 연구에서는 결국 송신노드-수신노드 무선채널과 송신노드-도청노드 무선채널이 제공하는 정보이론적 채널 용량 (Shannon capacity)의 차이로 보안전송률 (secrecy rate)을 정의하고 이를 최대화하는 기법들이 제안되었다. 이에 의하면 송신노드-도청노드 무선채널이 제공하는 전송률이 0이 아

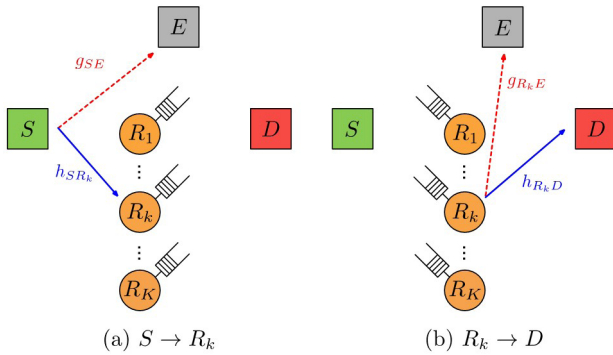


그림 7. 물리계층보안 환경에서 버퍼도움 중계전송 시스템모델

니더라도 보안전송률이 크면 클수록 도청노드가 정상적으로 정보를 복호하기 어려워지므로 보안이 강화된 것으로 간주하는 것이다.

〈그림 7〉은 물리계층보안 연구환경에 적용된 버퍼도움 중계전송의 기본 시스템모델을 보여준다. 인지통신 환경과 유사하지만 인지통신에서는 1차시스템 수신노드에서 요구하는 간섭량을 맞추어 송신노드에서 파워조절을 하는 반면, 물리계층보안 환경에서는 도청노드(E)에서 수신할 전송률을 최소화하면서 수신노드에서 수신할 전송률을 최대화하도록 한다. 즉, 이들의 차이로 모델링되는 보안전송률을 최대화하도록 링크 또는 중계기를 선택하게 된다. [20]에서는 중계기가 하나인 3노드 중계 네트워크에서 적응적 링크 선택 기법이 제안되었고, [21]에서는 다수 중계기 네트워크에서 최적 중계기 선택 기법이 제안되었다. 마지막으로 [22]에서는 증폭포워드(amplify-and-forward) 중계기를 고려한 물리계층보안을 위한 최대-비율(max-ratio) 중계기 선택 기법이 제안되었다.

V. 결론

본고에서는 차세대 버퍼도움 중계전송 기법에 대해서 살펴보았다. 중계전송은 4세대 이동통신 시스템에서 각광을 받아 많은 연구들이 진행되었으나, 통신가능영역 확대라는 비교적 제한적인 적용영역과 반이중(half-duplex) 전송에 의한 근본적으로 발생하는 손실로 인하여 이후 연구 방향이 모호하였다. 버퍼도움 중계전송 기법은 중계기에서 메모리를 활용하여 추가적인 선택 다이버시티 이득을 성취함으로써 기존 중계전송 기법의 단점을 보완하여 활발한 추가 연구들이 진행되고 있고, 차세대 통신 네트워크로 유망한 인지통신 및 물리계층보안 등에 적용이 가능하기 때문에 중계전송 연구분야의 차세대 유망한 발

전방향이 될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] D. Bharadia, K. Joshi, and S. Katti, "Robust full duplex radio link," in Proc. ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM), Aug. 2014.
- [4] 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.
- [5] B. Xia, Y. Fan, J. Thompson, H. V. Poor, "Buffering in a three node relay network," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 7, no. 11, pp. 4492–4496, Nov. 2008.
- [6] N. Zlatanov, R. Schober, and P. Popovski, "Throughput and diversity gain of buffer-aided relaying," in Proc. Globecom, Dec. 2011.
- [7] N. Zlatanov, R. Schober, and P. Popovski, "Buffer-aided relaying with adaptive link selection - fixed and mixed rate transmission," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 59, no. 5, pp. 2816–2840, May 2013.
- [8] N. Zlatanov and R. Schober, "Buffer-aided relaying with adaptive link selection," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 31, no. 8, pp. 1–13, Aug. 2013.
- [9] H. Liu, P. Popovski, E. de Carvalho, and Y. Zhao, "Sum-rate optimization in a two-way relay network with buffering," IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 1, pp. 95–98, Jan. 2013.
- [10] V. Jamili, N. Zlatanov, and R. Schober, "Bidirectional

- buffer-aided relay networks with fixed-rate transmission – Part I: Delay-unconstrained case,” IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 14, no. 3, pp. 1323–1338, Mar. 2015.
- [11] V. Jamali, N. Zlatanov, and R. Schober, “Bidirectional buffer-aided relay networks with fixed-rate transmission – Part II: Delay-constrained case,” IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 14, no. 3, pp. 1339–1355, Mar. 2015.
- [12] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, “A simple cooperative diversity method based on network path selection,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 24, no. 3, pp. 659–672, Mar. 2006.
- [13] A. Ikhlef, D. S. Michalopoulos, and R. Schober, “Max-max relay selection for relays with buffers,” IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 11, no. 3, pp. 1124–1135, Mar. 2012.
- [14] I. Krikidis, T. Charalambous, J. S. Thompson, “Buffer-aided relay selection for cooperative diversity systems without delay constraints,” IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 11, no. 5, pp. 1957–1967, May 2012.
- [15] M. Darabi, V. Jamali, B. Maham, and R. Schober, “Adaptive link selection for cognitive buffer-aided relay networks,” IEEE Commun. Lett., vol. 19, no. 4, pp. 693–696, Apr. 2015.
- [16] G. Chen, Z. Tian, Y. Gong, and J. Chambers, “Decode-and-forward buffer-aided relay selection in cognitive radio networks,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 63, no. 9, pp. 4723–4728, Sep. 2014.
- [17] M. Darabi, B. Maham, W. Saad, and X. Zhou, “Buffer-aided relay selection and secondary power minimization for two-way cognitive radio networks,” in Proc. IEEE Int’l Conf. Commun. (ICC), June 2015.
- [18] M. Shaqfeh, A. Zafar, H. Alnuweiri, and M. –S. Alouini, “Overlay cognitive radios with channel-aware adaptive link selection and buffer-aided relaying,” IEEE Trans. Commun., vol. 63, no. 8, pp. 2810–2822, Aug. 2015.
- [19] S. M. Kim and J. Kim, “Buffer-aided relay selection with primary sensing in underlay cognitive radio networks,” Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE), 2016. (To appear)
- [20] J. Huang and A. L. Swindlehurst, “Buffer-aided relaying for two-hop secure communication,” IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 14, no. 1, pp. 152–164, Jan. 2015.
- [21] X. Lu and R. C. de Lamare, “Buffer-aided relay selection for physical-layer security in wireless networks,” in Proc. Int’l ITG Workshop on Smart Antennas (WSA), Mar. 2015.
- [22] Y. Zhang, A. Sun, T. Liang, and X. Qiao, “Max-ratio relay selection for secure communication in amplify-and-forward buffer-aided cooperative networks,” in Proc. IEEE Int’l Conf. Sig. Process. Commun. Compt. (ICSPCC), Sep. 2015.

약 력



김수민

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