

그룹 이동성을 가지는 셀룰러 네트워크에서의 모바일 릴레이 선택 알고리즘

김지환⁰, 이주현, 손규호, 정송
한국과학기술원 전기 및 전자공학과

A mobile relay selection algorithm in cellular networks with group mobility

Jihwan Kim⁰, Joohyun Lee, Kyuho Son and Song Chong

Department of Electrical Engineering, KAIST

{kimji, jhlee, skio}@netsys.kaist.ac.kr, song@ee.kaist.ac.kr

요 약

셀룰러 네트워크에서 릴레이를 이용하면 셀 영역을 넓히고 더 높은 전송률을 얻을 수 있는 장점이 있다. 이런 장점은 릴레이를 설치하지 않고 주변의 다른 사용자들을 모바일 릴레이로 이용함으로써 얻을 수도 있다. 하지만 이를 위해서 릴레이로 이용할 사용자를 선택해야 하는데 최적 방식의 경우 모든 사용자에 대해 *exhaustive search* 을 통해 찾아야 하기 때문에 높은 복잡도를 필요로 한다. 여기서 사용자들이 그룹 이동성을 가지는 상황을 고려해 본다면 위의 최적 방식으로 선택된 릴레이들은 두 가지 특성을 가진다. 하나는 그룹 내에서 선택되는 릴레이의 수는 소수이고 한 번 선택된 릴레이는 몇 *time slot* 동안 반복되어 선택된다는 것이다. 따라서 본 논문은 이런 특성을 이용하여 최적 방식보다 낮은 복잡도를 가지고 최적 방식에 근접한 성능을 가지는 릴레이 선택 알고리즘을 제안하고 그 성능을 검증한다.

1. 서론

릴레이는 BS (base station) 와 사용자 사이를 이어 주는 중계자 역할을 하는 장치로 셀룰러 네트워크에서 셀 영역을 넓히고 더 높은 전송률을 갖게 하기 위하여 사용된다. 기존 셀룰러 네트워크에서 이런 릴레이의 역할은 특정 노드만 가능하였지만 본 논문에서는 최근 애드혹과 셀룰러의 결합 시스템[1] 연구처럼 주변 다른 사용자들이 모바일 릴레이 역할을 할 수 있는 시스템을 고려한다. 이를 통해 추가적인 릴레이 설치 없이 사용자를 릴레이로 이용하여 이득을 얻을 수 있다. 하지만 릴레이가 되는 사용자는 자신의 데이터가 아닌 다른 사용자의 데이터를 보내기 위해 자원을 써야 한다는 단점이 있고 주변 모든 사용자들이 릴레이가 될 수 있기 때문에 어떤 사용자를 릴레이로 선택해야 하는가도 문제가 된다. 본 논문에서는 사용자들이 그룹 이동성을 가진 경우 후자의 문제를 다루도록 한다.

그룹 이동성은 사용자들이 그룹을 형성하여 비슷한 방향, 비슷한 속력으로 움직이는 특성을 말한다.

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

이런 그룹 이동성은 개별적으로 움직이지 않고 집단으로 움직이는 군대의 경우나 도로 위에서 달리는 차량의 경우 등에서 나타난다. 이러한 그룹 이동성을 모사하기 위한 모델은 *column mobility*, *pursue mobility*, *reference point group mobility* 등이 있다[2].

본 논문에서는 사용자들이 그룹 이동성을 가지고 모바일 릴레이 역할을 할 수 있는 경우, 최적 방식인 *exhaustive search* 보다 낮은 복잡도로 최적 방식에 근접한 성능을 갖는 릴레이 선택 방식을 제안하고 이를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 시스템 모델

Single BS, single carrier, slotted time 환경에서 하향 링크를 고려한다. 그리고 BS 는 사용자에게 보내고자 하는 데이터가 무한대로 있고 사용자들은 그룹 이동성을 가진다고 가정한다.

N 은 사용자들의 집합이고 사용자들은 이동성에 따라 그룹 $k \subset N$ 에 속한다. $k(n)$ 은 사용자 $n \in N$ 이 속한 그룹으로 정의하고 사용자는 하나의 그룹에만 속한다.

그리고 $r_{bn}(t)$, $r_{xn}(t)$ 은 각각 시간 t 에 BS b 에

서 사용자 n 으로, 릴레이 x 에서 사용자 n 으로 보낼 수 있는 순간 전송률로 정의하고 $R_n(t)$ 는 시간 t 까지 사용자 n 이 받은 평균 전송률로 정의한다. 주어진 시간 간격 내에서 릴레이를 이용한 전송률이 최대가 되려면 BS가 릴레이에게, 릴레이가 사용자에게 보내는 데이터 양이 같아야 한다. 이를 달성하기 위해 이상적인 시간 분배가 가능하다고 가정한다. 이런 가정은 릴레이를 통한 2-hop 전송이 충분히 긴 시간 동안 유지되면 가능하다. 그러면 릴레이를 이용한 순간 전송률 $r_{b_{xn}}(t)$ 은

$$r_{b_{xn}}(t) = \frac{r_{bx}(t)r_{xn}(t)}{r_{bx}(t) + r_{xn}(t)} \quad (\text{식 1})$$

이 된다.

3. 기존 방식

3.1. 릴레이를 사용하지 않는 기존 방식

셀룰러 네트워크에서 릴레이를 사용하지 않고 데이터를 전송하는데 있어 시변하는 무선 채널의 특성을 효율적으로 이용하고 공정성까지 고려한 방식으로 α -proportional fair scheduling이 있다[3]. 이는 매 time slot마다 (식 2)를 통해 데이터를 전송할 사용자 n^* 를 선택하는 방식이다.

$$n^* = \arg \max_{n \in N} \frac{r_{bn}(t)}{R_n(t-1)^\alpha} \quad (\text{식 2})$$

3.2. 최적 방식

다른 사용자들 모바일 릴레이로 이용할 때 최적 방식은 매 time slot마다 (식 3)처럼 모든 사용자들 exhaustive search를 통해 릴레이를 이용하거나 BS와의 직접 통신을 통해 얻을 수 있는 최대 순간 전송률 $r_n^*(t)$ 을 찾고 이 값을 (식 2)에 $r_{bn}(t)$ 대신에 대입하여 스케줄링 하는 것이다.

$$r_n^*(t) = \max \left\{ r_{bn}(t), \max_{\substack{x \in N \\ x \neq n}} r_{b_{xn}}(t) \right\} \text{ for } \forall n. \quad (\text{식 3})$$

이런 최적 방식은 최대 순간 전송률을 구하기 위해 매 time slot마다 (식 3)처럼 모든 사용자가 다른 모든 사용자에 대해 exhaustive search를 해야만 하므로 <표 1>에서 보듯이 계산량과 피드백 측면에서 복잡도가 매우 크다.

4. 제안 방식

4.1 최적 방식에서 릴레이 특성

<그림 1>은 5.1 환경에서 매 time slot마다 그룹 내 사용자 중 90%에 해당하는 17명 이상의 사용자로부터 릴레이로 선택 받은 사용자를 나타내었다. 이를 보면 그룹 내 소수의 사용자가 다른 사용자의 릴레이가 되고 선택된 릴레이는 몇 time slot 동안

반복하여 선택되는 것을 알 수 있다.

전자의 경우 사용자들이 그룹 이동성을 가지기 때문에 그룹 내 사용자들 간의 거리가 BS와 사용자 간의 거리보다 가깝다고 할 수 있고 그에 따라 사용자들 간의 순간 전송률이 직접 통신하는 것보다 크게 된다. 그렇다면 릴레이를 이용한 순간 전송률에 대한 (식 1)은 릴레이와 BS 간의 순간 전송률 $r_{bx}(t)$ 로 근사 가능하다. 이는 BS와 사용자 간의 순간 전송률이 높은 소수 사용자가 다른 사용자들의 릴레이가 될 가능성이 높음을 의미한다.

그리고 그룹 이동성의 특성상 이전 time slot과 현 time slot 사이에 BS를 기준으로 사용자들의 위상 correlation이 크다. 즉, 이전 time slot에 그룹 내에서 BS와 가장 가까이 있던 사용자 그 다음 time slot에서도 BS와 가장 가까이 있을 확률이 크다. 가까이 있는 만큼 BS와 순간 전송률도 높고, 따라서 한 번 릴레이로 선택된 사용자가 반복하여 릴레이로 선택될 가능성이 높다.

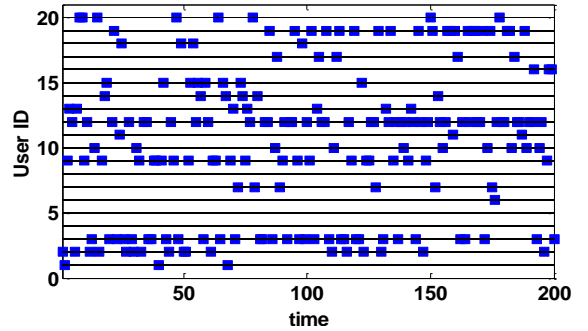


그림 1. 최적 방식에서 그룹 내 90% 사용자에게 릴레이로 선택 받은 사용자 분포

4.2 제안 방식의 알고리즘

앞서 4.1에서 살펴본 릴레이의 두 가지 특성을 가지면서 복잡도는 낮추기 위해서 그룹에서 대표 릴레이를 선택하여 그룹 내 모든 사용자가 공통으로 사용하고 대표 릴레이 선택은 T time slot마다 주기를 가지고 선택하는 방식을 제안한다. 이 때 대표 릴레이는 다음 주기 동안 BS와 평균 전송률이 높을 것으로 예상되는 사용자를 선정한다.

그러면 시간 t 에서 그룹 k 의 대표 릴레이는 다음과 같이 선택된다.

$$x_k^*(t) = \begin{cases} \arg \max_{x \in k} \{ \bar{r}_{bx}(t, M) \} & , \text{ if } t \bmod T = 0, \\ x_k^*(t-1) & , \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (\text{식 4})$$

여기서 $\bar{r}_{bx}(t, M) = \sum_{\tau=t-M+1}^{t-1} r_{bx}(\tau) / M$ 이다.

이제 3.2와 같이 사용자들이 얻을 수 있는 최대 순간 전송률 $r_n^*(t)$ 을

$$r_n^*(t) = \max \{ r_{bn}(t), r_{b_{x_k(n)}(t)n}(t) \} \quad (\text{식 5})$$

로 간단하게 구할 수 있고 이를 (식 2)에 $r_{bn}(t)$ 대신

에 대입하여 스케줄링 한다.

	기존 방식	제안 방식	최적 방식
릴레이 선택 알고리즘	-	T slot 마다 $O(N/K)$	$O(N)$
피드백 채널 수	N	$2N-K$	N^2

표 1. 기존 방식과 제안 방식의 복잡도 비교
N은 사용자 수, K는 그룹 수

<표 1>은 앞서 언급한 방식들의 복잡도를 비교한 것으로 제안 방식이 최적 방식에 비해서 복잡도가 매우 낮은 걸 볼 수 있다.

마지막으로 제안 방식에서 선정하는 그룹의 대표 릴레이의 수를 하나가 아닌 여러 개로 늘릴수록 최적 방식에 근접한 성능을 가지고 그에 따라 복잡도는 늘어나는 관계가 있다.

5. 시뮬레이션

5.1. 시뮬레이션 환경

셀 내에는 20 명의 사용자가 있고 이들의 그룹 이동성을 모사하기 위해서 그룹 구성원이 리더의 변위에 노이즈 성분이 더해진 방향으로 움직이는 reference point group mobility model 을 사용한다[2]. 무선 채널은 path-loss 모델에 shadowing 을 모사하기 위해 거리에 따라 correlation 이 있는 shadow fading correlation model[4]을 사용한다. 여기에 fast fading 은 Rayleigh fading 을 이용해 모사한다. 그룹 내에 대표 릴레이를 몇 명까지 선정하는가에 따라 제안 방식을 proposed1, proposed2, proposed3 로 나눈다.

5.2. 시뮬레이션 결과

<그림 2>를 보면 제안 방식에서 대표 릴레이 선정 주기가 길어질수록 최적의 릴레이와 대표 릴레이의 오차가 커져 성능이 떨어진다. 하지만 100 slot 까지는 성능이 유지되므로 이를 복잡도는 낮추면서 성능 손실은 거의 없는 최대 주기로 잡을 수 있다.

<그림 3>을 보면 기존 방식의 경우 공평성이 강조될수록 평균 데이터 전송률은 큰 폭으로 떨어지게 된다. 이는 채널상태가 열악한 사용자에게 낮은 순간 전송률로 전송을 해야 하기 때문이다. 반면 최적 방식의 경우 채널상태가 열악한 사용자가 채널상태가 우수한 사용자를 릴레이로 이용하기 때문에 공평성이 강조 되어도 거의 일정한 평균 전송률을 가진다.

제안 방식은 대표 릴레이의 수를 늘릴수록 최적 방식과 오차를 줄일 수 있기 때문에 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다. 그리고 기존 방식에 비해 얻는 이득을 보면 대표 릴레이는 하나만 선정하여도 충분하다고 할 수 있다. α 가 10 인 경우 기존 방식 대비 이득은 37%이다. 이는 최적 방식인 경우 이득에 86%에 달하는 값으로 제안 방식이 최적 방식보다 매우 낮은 복잡도로도 거의 근접한 성능을 가

짐을 보여준다.

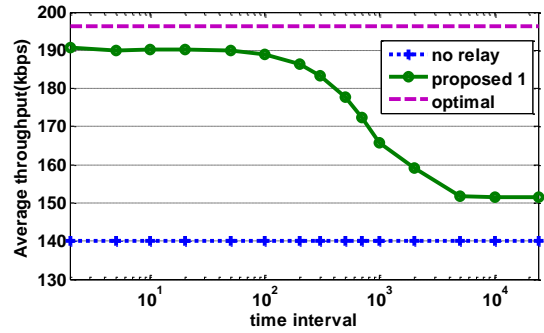


그림 2. $\alpha = 10$ 일 때 대표 릴레이 선정 주기에 따른 성능 변화

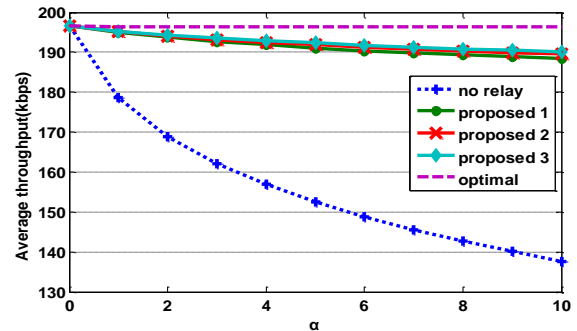


그림 3. T=100 일 때 α 의 변화에 따른 성능 변화

6. 결론

본 논문에서는 사용자가 모바일 릴레이 역할을 해 줄 수 있고 그룹 이동성을 가지는 상황에서 낮은 복잡도로도 최적 방식에 근접한 성능을 가지는 알고리즘을 제안하였다. 최적 방식에서 선택되는 릴레이의 특성이 그룹에서 소수의 사용자가 다른 모든 사용자의 릴레이 역할을 하고 한 번 선택된 릴레이는 몇 time slot 동안 반복해서 선택된다는 점을 이용하였다.

시뮬레이션 결과를 보면 제안 방식은 기존 방식 대비 37%의 이득을 얻고 이는 최적 방식의 이득에 86%에 달하는 값이다. 즉, 최적 방식보다 낮은 복잡도로 거의 근접한 성능 이득을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

7. 참고 문헌

- [1] H. Wu, C. Qiao, S. De and O. Tonguz, "Integrated cellular and ad hoc relaying systems: iCAR," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 19, no. 10, Oct. 2001.
- [2] X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and C. Chiang. "A group mobility model for ad hoc wireless networks," *MSWiM*, Aug. 1999.
- [3] J. M. Holtzman, "Asymptotic analysis of proportional fair algorithm," *PIMRC*, Sept. 2001.
- [4] I. Forkel M Schinnenburg and M. Ang, "Generation of Two-Dimensional Correlated Shadowing for Mobile Radio Network Simulation," *WPMC*, Sep. 2004.