

논문 2012-50-5-3

멀티채널 멀티라디오 멀티세션 무선 네트워크를 위한 네트워크 코딩 기반 계층간 최적화 기법

(Cross-layer Optimization for Multichannel Multiradio Multisession
Wireless Networks with Network Coding)

박 무 성*, 윤 원 식**

(Museong Park and Wonsik Yoon[©])

요 약

네트워크 코딩은 브로드캐스트와 오버히어링 특성을 통해 네트워크의 처리율 향상을 가져오는 기법으로 널리 연구되고 있다. 본 논문에서는 인트라세션 네트워크 코딩 방법을 사용하여 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션으로 구성된 무선 멀티홉 네트워크 환경의 네트워크 유틸리티 향상을 위한 네트워크 유틸리티 최대화 문제를 모델링한다. 그리고 주어진 환경에서의 유틸리티 최대화 문제의 해를 구하기 위해 혼잡 제어 알고리즘, 분산 레이트 제어 알고리즘 그리고 휴리스틱 자원 할당 알고리즘을 제안한다. MATLAB을 사용하여 제안한 알고리즘에 대한 성능 평가를 하였으며 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션의 변화에 따른 네트워크 유틸리티를 구하였다. 그 결과, 제안한 세 가지 알고리즘을 통해 무선 멀티홉 네트워크에서 처리율 향상이 이루어짐을 알 수 있으며 본 논문에서 제안한 알고리즘을 통해 네트워크 처리율 최적화 문제에 대한 솔루션을 제시하였다.

Abstract

Network coding has been extensively studied to increase the network throughput by exploiting the broadcast and overhearing capabilities. In this paper, we formulate a network utility maximization problem to improve the network utility in multichannel, multiradio and multisession wireless multihop network with intrasession network coding. To find the solution of this problem, we propose a congestion control, distributed rate control, and heuristic resource allocation algorithm. We find the network utility and evaluate the performance in multichannel, multiradio and multisession environment by using MATLAB. Finally, the results show that the proposed schemes can achieve throughput improvement by performing the network utility optimization in wireless multihop network.

Keywords : network coding, congestion control, rate control, resource allocation, distributed algorithm

I. 서 론

네트워크 코딩은 유, 무선 네트워크에서 처리율 향상을 가져올 수 있는 기법으로 인정받아 현재 다양한 분

야에서 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1]-[4]}. 이 방식은 중계 노드가 수신한 패킷을 다음 홉 노드로 전송하기에 앞서 패킷의 코딩을 수행한 후 패킷을 전송한다. 네트워크 코딩 방식은 무선 환경이 가지고 있는 브로드캐스트 특성과 오버히어링 특성 때문에 무선 환경에 적합한 방식이며 이러한 장점을 활용함으로써 무선 네트워크의 처리율 향상을 가져올 수 있다^[5-7]. 네트워크 코딩 방식은 두 종류로 나누어진다. 첫 번째는 서로 다른 플로우의 패킷들을 결합하는 인터세션 네트워크 코딩이다. 두 번째 방식은 같은 플로우의 패킷을 결합하는 인트라세션 네트워크 코딩이다. 이 두 가지 네트워크 코딩 방식

* 학생회원, ** 정회원, 아주대학교 전자공학과
(Department of Electrical and Computer Eng.,
Ajou University)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0022635)

© Corresponding Author(E-mail:wsyoon@ajou.ac.kr)
접수일자 2013년1월17일, 수정완료일 2013년4월22일

은 전송 횟수를 줄일 수 있어 네트워크의 처리율 향상에 기여할 수 있다^[8~12].

최근의 무선 네트워크는 멀티채널, 멀티라디오의 활용이 보편적으로 자리잡고 있다. 각 노드는 다수의 라디오 인터페이스 카드와 직교채널을 활용해 노드간 전송 간섭을 최소화하면서 동시에 여러 개의 링크로 통신할 수 있다. 이로써 다수의 채널과 라디오가 있어 가용 자원이 풍부한 경우, 멀티라디오 멀티채널 환경에서 네트워크 코딩을 위한 정교한 기법이 필요하다. 또한, 이웃과 가용 대역폭의 완전한 활용을 위한 알고리즘의 설계가 요구된다.

네트워크 코딩 기반 네트워크 혼잡 제어 기법에 대한 연구는 네트워크 코딩을 수행하는 네트워크 계층과의 계층간 최적화를 다루는 과정이다. 전송 과정의 흐름을 관찰하여 손실이 발생하게 되면 소스 노드가 인가하는 패킷의 양을 조정하여 성능의 저하를 최소화하는 방법이 활용된다^[13]. 네트워크 코딩을 고려한 기존의 혼잡 제어 기법 연구들은 싱글채널 싱글라디오 환경으로 구성된 무선 네트워크에서 수행되었다^[14~15]. 그러나 이러한 기존 연구는 실제 최근에 널리 활용되고 있는 멀티채널, 멀티라디오 환경의 무선 네트워크에 직접 적용할 수 없는 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 네트워크 처리율 최적화 문제에서 해를 얻는 과정으로, 일반적으로 널리 알려진 dual decomposition 방법^[16]을 사용하여 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션 무선 네트워크에 적용되는 혼잡 제어 알고리즘을 제안한다. 이로써 보편적인 무선 네트워크에 적용할 수 있는 계층간 최적화 알고리즘을 제시한다.

또한 무선 네트워크의 네트워크 유틸리티 최대화 문제를 해결하기 위해 네트워크 코딩을 고려하는 분산 레이트 조정 알고리즘과 휴리스틱 자원 할당 알고리즘을 함께 제안한다. 분산 알고리즘은 중앙 집중화된 알고리즘에 비해 계산의 부하와 오버헤드 감소의 장점을 가지고 있다. 기존의 연구에서도 분산 최적화 알고리즘을 사용하여 무선 네트워크의 최적화 문제를 푸는 과정이 존재하지만, 이는 싱글채널 싱글라디오 환경에 적용된 것으로 보편적으로 사용되는 멀티채널 멀티라디오 무선 네트워크에 적용에는 한계가 존재한다^[17]. 따라서 멀티채널, 멀티라디오 환경을 고려하는 네트워크에서 분산 레이트 조정 알고리즘을 통해 최적화 문제를 풀고, 네트워크 코딩이 사용된 네트워크의 가용 대역폭을 효율적으로 활용하기 위한 자원 할당 알고리즘을 제안한다. 최적의 자원 할당을 구하는 문제는 NP-hard의 복잡도

를 가지므로^[18], 그 대안으로 휴리스틱한 자원할당 방법을 제안한다.

본 논문에서는 인프라세션 네트워크 코딩을 활용하여 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션 무선 멀티홉 네트워크에서의 처리율 최적화를 위한 방법을 제안한다. 먼저, 네트워크 유틸리티 최대화 문제를 구성하고 해를 구하기 위하여 네트워크의 종단간 피드백을 통한 혼잡 제어 알고리즘, 분산 레이트 제어 알고리즘 그리고 휴리스틱 자원 할당 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 아래와 같다. II장에서는 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션 무선 멀티홉 네트워크에 대한 기본적인 환경을 수식화하며 네트워크 유틸리티 최대화 문제를 구성한다. 그리고 제안한 혼잡 제어 알고리즘, 분산 레이트 조정 알고리즘, 자원 할당 알고리즘에 대해 기술한다. III장에서는 제안한 알고리즘에 대한 성능 평가를 수행하고 IV장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 본 론

본 장에서는 멀티채널, 멀티라디오 무선 멀티홉 네트워크 모델을 수식적으로 나타내고, 네트워크 코딩을 고려하는 네트워크 유틸리티 최대화 프레임워크를 구성한다. 그리고 네트워크의 종단간 피드백을 고려하는 혼잡 제어를 활용하는 분산 레이트 조정 알고리즘을 통해 최적화 문제를 수학적으로 해결한다. 또한 네트워크 코딩 방식을 적용한 멀티채널, 멀티라디오 무선 멀티홉 네트워크에서 가용 대역폭을 완전히 사용하기 위한 휴리스틱 자원 할당 알고리즘을 기술한다.

1. 네트워크 환경

다수의 채널과 라디오를 활용할 수 있으며 다수의 유니캐스트 세션이 존재하는 무선 멀티홉 네트워크 환경을 가정한다. N 개의 노드로 이루어진 네트워크에서 노드 i 가 사용할 수 있는 라디오의 수를 r_i ($i=1,2,\dots,N$)로 나타낸다. 그리고 전체 네트워크에서 사용 가능한 직교 채널의 수를 K 로 나타내며 ($r_i \leq K$)의 조건을 갖는다. 하나의 라디오는 전송 또는 수신을 위하여 한 번에 한 개의 채널만을 사용할 수 있다. 패킷 전송을 위해 네트워크상의 노드를 공유하여 사용하는 유니캐스트 세션들의 집합을 A_s 로 나타내며, 하나의 세션 a 에 대하여 패킷을 생성해 전송을 시작하는 소스 노드와 패킷 전달의 종착지인 목적지 노드의 쌍을 (S_a, T_a)로 나타낸다. 각각의 유니캐스트 세션에 대해서 소스 노드와 목

적지 노드를 제외한 나머지 노드들은 중간 노드가 되어 패킷을 전달한다.

무선 멀티홉 네트워크의 토폴로지 그래프를 $G(V, E)$ 로 나타낸다. V 는 모든 노드의 집합을 나타내며 $|V|=N$ 이 된다. 각 노드의 배치는 고정되어 있다고 가정한다. 그리고 전송 링크의 집합은 E 로 나타내며 전송 링크의 조건은 다음과 같다. 세션 a 에서 노드 i 가 목적지 노드 T_a 와 떨어진 거리를 d_i^a 로 가정할 때, 노드 i 와 j 사이에서 세션 a 에 대한 링크를 $(i, j)_a = \{(i, j)|d_i^a > d_j^a, \forall i, j \in V, j \in N(i), \forall a \in A_S\}$ 로 나타내며 $\forall (i, j)_a \in E$ 가 된다. $N(i)$ 는 노드 i 의 전송 반경 안에 위치한 노드의 집합을 나타낸다. 채널 k 를 사용하는 링크 (i, j) 의 전달 확률을 p_{ij}^k 로 나타내며, 이 링크의 플로우 레이트를 x_{ij}^k 로 나타낸다.

2. 네트워크 유틸리티 최대화 프레임워크

1절에서 설정한 네트워크의 변수들을 활용하여 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션 무선 멀티홉 네트워크에 대한 네트워크 유틸리티 최대화 프레임워크를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\max_{\mathbf{x}} \sum_{a \in A_S} U_a \left(\sum_{k \in K} \sum_{j < S_a} x_{S_a j}^{ka} \right) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K} \sum_{j > T_a} x_{j T_a}^{ka} = \sum_{k \in K} \sum_{j < S_a} x_{S_a j}^{ka} \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j > i} x_{ji}^{ka} = \sum_{k \in K} \sum_{j < i} x_{ij}^{ka} \quad (3)$$

$$x_{ij}^{ka} \geq 0, \forall (i, j) \in E, \forall k \in K, \forall a \in A_S \quad (4)$$

$$z_i^{ka} + \sum_{j \in N(i)} z_j^{ka} \leq C_{ka}, \quad \forall i \in V \setminus S_a, \forall k \in K, \forall a \in A_S \quad (5)$$

$$z_i^{ka} R_i p_{ij}^k \geq x_{ij}^{ka}, \quad \forall i \in V \setminus T_a, \forall j \in N(i), \forall k \in K, \forall a \in A_S \quad (6)$$

식 (1)은 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션의 무선 네트워크에서 최대의 처리율을 얻기 위한 목적 함수이다. 각각의 유니캐스트 세션 a 의 유틸리티 함수를 $U_a(\cdot)$ 로 나타내며 각각의 세션 a 의 소스 노드 S_a 에서 전송되는 플로우 레이트에 대한 단조 증가 및 strictly

concave 함수이다. 자연로그 함수 $\ln(\cdot)$ 을 유틸리티 함수로 사용하며, 이 함수는 유틸리티 최대화 목적에 잘 부합한다. 그리고 식 (1)에서 $j < S_a$ 는 노드 j 가 노드 S_a 보다 목적지 노드 T_a 에 가까이 있음을 의미한다. 따라서 $\sum_{k \in K} \sum_{j < S_a} x_{S_a j}^{ka}$ 는 세션 a 의 소스 노드 S_a 에서 전송하는 모든 패킷의 수를 나타낸다.

식 (2)-(6)은 목적 함수인 식 (1)에 대한 조건식이다. 식 (2)는 각각의 세션에서 소스 노드에서 전송하는 패킷의 수와 목적지 노드에 전달되는 패킷의 수가 같음을 나타낸다. 이는 인트라세션 네트워크 코딩 방식의 전송에서 소스 노드에서 전송되는 독립적인 패킷의 수와 목적지 노드에서 수신하는 독립적인 패킷의 수가 동일하여, 목적지 노드에서 디코딩을 통해 원본 정보를 획득할 수 있음을 나타낸다. 식 (3)은 노드 i 에서 수신하는 패킷 수와 전송하는 패킷 수가 같음을 나타낸다. 즉, 중간 노드에서는 네트워크 코딩 과정 이외에 별도로 새로운 패킷의 생성을 하지 않음을 의미한다. 식 (4)는 링크의 플로우 레이트 조건을 의미하며, 이 값은 방향성을 포함하고 있지 않음을 나타낸다. 식 (5)는 네트워크에서 채널 스케줄링 조건을 나타낸다. z_i^{ka} 는 노드 i 가 세션 a 의 패킷에 대해 채널 k 를 이용하여 전송할 때 브로드캐스트 레이트를 나타낸다. 또한 C_{ka} 는 세션 a 에 대하여 채널 k 의 용량을 나타낸다. 즉, 노드 i 와 이 노드의 전송 반경 내의 노드 j 는 세션 a 에 대하여 채널 k 의 채널 용량을 나누어 쓰고 있음을 의미하며 브로드캐스트 레이트 z_i^{ka} 는 채널 용량 C_{ka} 에 의해 제한을 받는다. 식 (6)은 브로드캐스트 레이트, 데이터 레이트 그리고 전달 확률로 나타내는 플로우 레이트 조건이다. 즉, 링크의 플로우 레이트는 전송 속도와 링크의 전달 확률을 고려해서 결정되어야 함을 나타낸다. 본 논문에서는 싱글레이트 환경이므로 데이터 레이트 R_i 를 상수로 가정한다.

3. 제안하는 알고리즘

앞 절의 네트워크 유틸리티 최대화 문제를 해결하는 방법은 여러 가지가 있다. 본 논문에서는 Lagrangian dual function을 활용하는 dual decomposition 방법을 사용하여 문제를 해결하고 알고리즘을 제안한다. 먼저 식 (1)-(6)을 Lagrangian dual function으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$L(\mathbf{z}, \mathbf{x}; \boldsymbol{\rho}, \mathbf{q}, \boldsymbol{\beta}) = \sum_{a \in A_S} U_a \left(\sum_{k \in K_j < S_a} x_{S_a j}^{ka} \right) - \sum_{a \in A_S} q_{S_a} \left(\sum_{k \in K_j < S_a} x_{S_a j}^{ka} - \sum_{k \in K_j > T_a} x_{j T_a}^{ka} \right) - \sum_{a \in A_S} \sum_{k \in K_j \in V} \beta_i^{ka} \left(z_i^{ka} + \sum_{j < i} z_j^{ka} - C_{ka} \right) + \sum_{a \in A_S} \sum_{k \in K_j < i} \rho_{ij}^{ka} \left(z_i^{ka} R_i p_{ij}^k - x_{ij}^{ka} \right) \quad (7)$$

식 (7)을 통해 본래의 유틸리티 최대화 문제와 등가의 식을 나타내면 다음과 같다.

$$\min_{\boldsymbol{\rho}, \mathbf{q}, \boldsymbol{\beta}} \max_{\mathbf{z}, \mathbf{x}} L(\mathbf{z}, \mathbf{x}; \boldsymbol{\rho}, \mathbf{q}, \boldsymbol{\beta}) \quad (8)$$

Lagrangian dual function을 이용하여 dual function을 정리하면 다음과 같다.

$$\max_{\mathbf{z}, \mathbf{x}} L(\mathbf{z}, \mathbf{x}; \boldsymbol{\rho}, \mathbf{q}, \boldsymbol{\beta}) \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K_j > i} x_{ji}^{ka} = \sum_{k \in K_j < i} x_{ij}^{ka} \quad (10)$$

$$x_{ij}^{ka} \geq 0, \forall (i, j) \in E, \forall k \in K, \forall a \in A_S \quad (11)$$

식 (9)-(11)을 세 개의 subproblem으로 분할하고 정리하면, 다음과 같다.

D_1 :

$$\max_{\mathbf{x}^{i=S_a}} \left[U_a \left(\sum_{k \in K_j \in N(S_a)} x_{S_a j}^{ka} \right) - q_{S_a} \sum_{k \in K_j \in N(S_a)} x_{S_a j}^{ka} - \sum_{k \in K_j \in N(i)} \rho_{S_a j}^{ka} x_{S_a j}^{ka} \right] \quad (12)$$

D_2 :

$$\max_{\mathbf{x}^{i=S_a}} \left[q_{S_a} \sum_{k \in K(j, T_a) \in E} x_{j T_a}^{ka} - \sum_{k \in K(i, j) \in E} \rho_{ij}^{ka} x_{ij}^{ka} \right] \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K_j > i} x_{ji}^{ka} = \sum_{k \in K_j < i} x_{ij}^{ka} \quad (14)$$

$$x_{ij}^{ka} \geq 0, \forall (i, j) \in E, \forall k \in K, \forall a \in A_S \quad (15)$$

D_3 :

$$\max_{\mathbf{z}^{i=S_a}} \left[\sum_{j < i} \rho_{ij}^{ka} z_i^{ka} R_i p_{ij}^k - \sum_{i \in V} \beta_i^{ka} \left(z_i^{ka} + \sum_{j \in N(i)} z_j^{ka} - C_{ka} \right) \right] \quad (16)$$

Decomposition을 통해 얻은 3개의 subproblem 각각의 최적화를 위한 과정을 식 (12)-(16)에 나타냈다. D_1 은 혼잡 제어 문제를 나타낸다. 또한 D_2 는 라우팅 문제를 나타낸다. 그리고 D_3 은 브로드캐스트 레이트 조정 문제를 나타낸다. D_1 , D_2 , D_3 의 문제는 Lagrange multiplier $\boldsymbol{\rho}$, \mathbf{q} , $\boldsymbol{\beta}$ 의 값을 활용하여 독립적으로 풀 수 있다. 각각의 Lagrange multiplier의 값은 subgradient method를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_{S_a}(t+1) = q_{S_a}(t) + \theta_1(t) \left(\sum_{k \in K_j < S_a} x_{S_a j}^{ka}(t) - \sum_{k \in K_j > T_a} x_{j T_a}^{ka}(t) \right) \quad (17)$$

$$\rho_{ij}^{ka}(t+1) = \left[\rho_{ij}^{ka}(t) - \theta_2(t) (z_i^{ka}(t) R_i p_{ij}^k - x_{ij}^{ka}(t)) \right]^+ \quad (18)$$

$$\beta_i^{ka}(t+1) = \left[\beta_i^{ka}(t) + \theta_3(t) \left(z_i^{ka}(t) + \sum_{j \in N(i)} z_j^{ka}(t) - C_{ka} \right) \right]^+ \quad (19)$$

각각의 Lagrange multiplier를 계산할 때, θ_1 , θ_2 , θ_3 은 step size로 각각 q_{S_a} , ρ_{ij}^{ka} , β_i^{ka} 의 값을 결정하기 위해 사용되는 변수이다. 각각의 step size를 정하기 위해 scaling factor A_n , B_n 그리고 C_n 의 값을 임의의 상수로 정하고 step size $\theta_n(t) = A_n / (B_n + C_n \times t)$ 로 구하였다. 또한 $[\cdot]^+$ 는 $[0, +\infty]$ 의 범위의 값만을 가질 수 있음을 나타낸다.

D_1 의 문제를 풀기 위하여 식 (12)를 변형한다. 이는 node specific한 문제로 구성하여 소스 노드와 목적지 노드의 패킷 전송의 결과를 반영하여 혼잡 제어를 반영하기 위한 과정이다. 식 (12)에서 $\sum_{k \in K_j > i} x_{S_a j}^{ka} = x_{S_a}^a$, $\sum_{k \in K_j > i} \rho_{S_a j}^{ka} x_{S_a j}^{ka} = \rho_{S_a}^a x_{S_a}^a$ 을 활용하여 식 (20)을 얻는다. 이 식을 first-order optimal condition^[19]에 의하여 정리하면 식 (21)과 같은 해를 얻을 수 있다.

$$\max_{\mathbf{x}^{i=S_a}} \left[U_a(x_{S_a}^a) - q_{S_a} x_{S_a}^a - \rho_{S_a}^a x_{S_a}^a \right] \quad (20)$$

$$x_{S_a}^a = U'^{-1}(q_{S_a} + \rho_{S_a}^a) \quad (21)$$

식 (21)에서 얻은 $x_{S_a}^a$ 는 q_{S_a} 와 $\rho_{S_a}^a$ 에 의하여 결정되며

반비례하는 관계이다. 식 (17)에 의하여 소스 노드에서 전송되는 패킷의 수가 목적지 노드에서 수신하는 패킷의 수보다 큰 경우 q_{S_s} 가 상승한다. 즉, 패킷 전송의 저하를 가져오는 q_{S_s} 항의 상승은 소스 노드에서 전송하는 패킷의 수를 감소시킨다. 따라서 q_{S_s} 는 소스 노드의 전송이 목적지 노드에 도달하는지 여부를 나타내어 네트워크의 종단간 피드백을 반영함을 알 수 있다.

D_2 에서는 라우팅 결과를 반영하여, 중간 노드에서 전송할 패킷 수를 결정한다. 식 (13)에서 q_{S_s} 가 상승하면, 중간노드가 전송할 패킷 수 x_i^a 가 상승하게 된다. 이 때, 식 (13)의 문제는 job scheduling problem^[20]의 일반화 과정처럼 해석할 수 있다. ρ_{ij}^{ka} 는 job에 대한 cost를 나타내게 된다.

D_3 의 식 (16)을 풀기 위하여 $w_i^{ka} = \sum_{j < i} \rho_{ij}^{ka} p_{ij}^k$ 를 사용하여 식 (22)과 같이 정리한다. 이 식을 브로드캐스트 레이트 z_i^{ka} 에 대하여 묶어 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\max_{\mathbf{z}, i \in \mathcal{S}_i} \left[w_i^{ka} R_i z_i^{ka} - \sum_{i \in V} \beta_i^{ka} \left(z_i^{ka} + \sum_{j \in N(i)} z_j^{ka} - C_{ka} \right) \right] \quad (22)$$

$$\max_{\mathbf{z}, i \in \mathcal{S}_i} \left[\left(w_i^{ka} R_i - \beta_i^{ka} - \sum_{j \in N(i)} \beta_j^{ka} \right) z_i^{ka} + \beta_i^{ka} C_{ka} \right] \quad (23)$$

이 식을 풀기 위하여 proximal algorithm^[21]을 사용하여 식 (24)와 같이 이차 항과 보조 변수를 추가하여 브로드캐스트 레이트 z_i^{ka} 에 대한 해를 구할 수 있다.

$$\max_{\mathbf{z}, i \in \mathcal{S}_i} \left[\left(w_i^{ka} R_i - \beta_i^{ka} - \sum_{j \in N(i)} \beta_j^{ka} \right) z_i^{ka} - \phi \| \mathbf{z} - \mathbf{y} \|^2 + \beta_i^{ka} C_{ka} \right] \quad (24)$$

이 때 ϕ 는 해를 구하기 위해 사용되는 작은 양의 상수이며, \mathbf{y} 는 벡터 \mathbf{z} 의 해를 구하기 위한 보조 변수로 각각 $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_i, \dots, y_N]^T$ 와 $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_i, \dots, z_N]^T$ 로 나타내며, $y_i(t+1) = z_i^{ka}(t)$ 이다. 식 (24)를 통해 브로드캐스트 레이트 z_i^{ka} 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$z_i^{ka}(t+1) = z_i^{ka}(t) - \frac{w_i^{ka} - \beta_i^{ka} - \sum_{j \in N(i)} \beta_j^{ka}}{2\phi} \quad (25)$$

그리고 이 경우 z_i^{ka} 를 위한 목적함수인 식 (16)이 strictly concave한 조건을 만족하지 않기 때문에 primal recovery method^[21]를 사용하여 다음과 같이 primal solution을 얻는다.

$$z_i^{ka}(t) = \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t z_i^{ka}(\tau) \quad (26)$$

III. 성능 평가

본 장에서는 제안한 알고리즘에 대한 성능 평가 결과를 기술한다. 성능 평가를 위해 MATLAB 프로그램을 사용하였다. 먼저 16개의 무선 노드를 가정하고, 이것이 무작위로 배치한 랜덤 토폴로지의 환경에서 성능 평가를 수행하였다. 각 노드는 멀티라디오로 구성되었고, 멀티채널을 통해 전송한다. 또한 멀티세션이 동시에 패킷을 전송하도록 구성되었다. 먼저, 제안한 알고리즘을 반복적으로 수행하였을 때의 처리율 변화를 관찰하고 분석한다. 이 때, 처리율을 최대화하는 과정을 그래프로 나타내었다. 처리율의 크기가 일정하게 수렴하게 되면, 주어진 상황에서 최적해를 구한 것을 확인할 수 있다. 8개의 세션이 동작하는 환경을 가정하고, 세 가지의 이용 가능한 라디오 및 채널 수를 설정하고 측정하였다. 이는 각각 (7 라디오, 7 채널), (4 라디오, 7 채널), (4 라디오, 4 채널)이다.

그림 1을 통해 각각의 환경에서 네트워크의 처리율이 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 각각의 세션이 목적지 노드까지 최적의 경로를 통해 전송하게 되었음을 나타내며, 자원 할당 과정이 각 노드에서 지속적

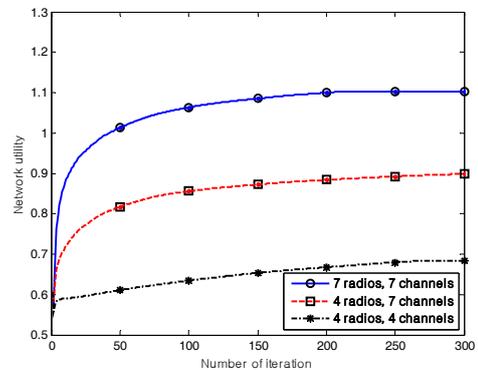


그림 1. 8개 세션으로 구성된 무선 네트워크의 처리율
Fig. 1. Network utility of wireless network with eight sessions.

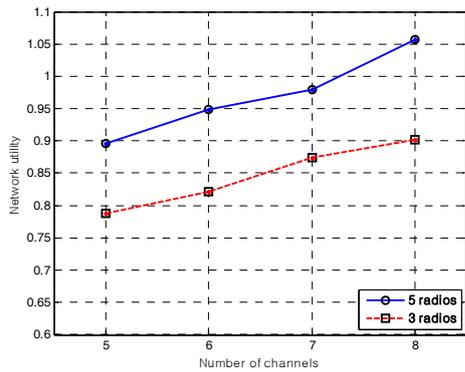


그림 2. 8개 세션으로 구성된 무선 네트워크의 라디오 개수 변화에 따른 채널 개수 별 처리율
Fig. 2. Network utility of wireless network in terms of the number of channels depending on the number of radios with eight sessions.

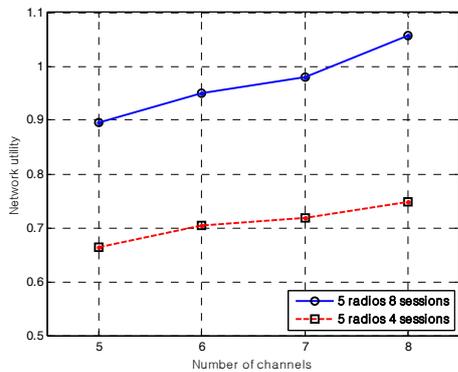


그림 3. 노드별 라디오 개수가 4개인 무선 네트워크의 세션 개수 변화에 따른 채널 개수 별 처리율
Fig. 3. Network utility of wireless network in terms of the number of channels depending on sessions with four radios.

으로 이루어지고 있음을 나타낸다. 또한 동일한 개수의 세션이 동시 전송을 하는 경우 활용할 수 있는 채널 또는 라디오의 개수가 많을수록 처리율이 높게 나타남을 확인할 수 있다.

다음으로 활용할 수 있는 채널 수에 따라서 라디오 개수 변화에 따른 네트워크 처리율의 변화 측정을 통해 멀티채널, 멀티라디오 환경에서 제안한 알고리즘의 성능 평가를 수행하였다. 8개의 세션이 동시에 전송하는 환경에서 활용 가능한 채널의 수를 5개에서 8개까지 늘려가면서 각 노드의 라디오 수를 5개와 3개로 고정하였을 경우의 네트워크 유틸리티의 결과를 확인하였다. 그림 2의 결과는 활용하는 채널의 개수가 많을수록, 그리고 많은 라디오를 활용할 수 있을 때 네트워크 유틸리티가 상승함을 확인할 수 있다.

세 번째로 네트워크에서 동시에 전송하는 세션의 수가 변화하는 경우에 네트워크 유틸리티 변화를 그래프로 나타내었다. 각각의 노드는 5개의 라디오를 가지고 있고 활용할 수 있는 채널의 수는 5개부터 8개까지 변화하는 환경에서 처리율을 측정하였다.

그림 3의 결과로부터 세션의 개수가 많을수록 처리율이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 동시 전송하는 링크가 많음에도 멀티채널, 멀티라디오의 환경에서 처리율 최적화가 되었음을 나타내며, 제한한 세 가지 알고리즘을 통해 무선 네트워크의 처리율 최적화가 이루어짐을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 네트워크 코딩을 고려한 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션의 무선 멀티홉 네트워크의 처리율 향상을 위한 방법을 제안하였다. 주어진 환경에서 네트워크 유틸리티 최대화 문제를 구성하고 네트워크의 종단간 피드백을 고려하는 혼잡 제어 알고리즘, 분산 레이트 조정 알고리즘 그리고 휴리스틱 자원 할당 알고리즘의 세 가지 과정을 통해 제시한 유틸리티 최대화 문제의 해를 구하였다. 제시한 네트워크 환경을 MATLAB 프로그램을 사용해 전송 환경을 구성하고, 랜덤 토폴로지에서 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션의 조건의 변화에 따라 제안한 알고리즘을 풀어 구한 네트워크 유틸리티를 그래프로 나타내었다. 성능 평가를 통해 멀티채널, 멀티라디오, 멀티세션을 갖는 무선 네트워크에서 각각의 채널, 라디오, 세션 수 증가에 따라 처리율이 향상됨을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 알고리즘을 통해 네트워크 처리율 최적화 문제에 대한 솔루션을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. Ahlswede, N. Cai, S. Li, and R. Yeung, "Network information flow," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, pp. 1204 - 1216, Jul. 2000.
- [2] R. Koetter and M. Médard, "An algebraic approach to network coding," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 11, pp. 782 - 795, Oct. 2003.
- [3] T. Ho, M. Médard, J. Shi, M. Effros, and D. Karger, "On randomized network coding," *in*

- Proc. of the 41st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2003.
- [4] S. Jaggi, M. Langberg, S. Katti, T. Ho, D. Katabi, and M. Médard, "Resilient network coding in the presence of byzantine adversaries," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 616 - 624, May 2007.
- [5] S. Deb, M. Effros, T. Ho, D. R. Karger, R. Koetter, D. S. Lun, M. Médard, and N. Ratnakar, "Network coding for wireless applications: a brief tutorial," *Presented 2005 International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks (IWWAN)*, 2005.
- [6] C. Fragouli, D. Katabi, A. Markopoulou, M. Médard, and H. Rahul, "Wireless network coding: opportunities & challenges," in *Proc. of IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2007)*, pp. 1 - 8, 2007.
- [7] L. Chen, T. Ho, S. Low, M. Chiang, and J. Doyle, "Optimization based rate control for multicast with network coding," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 1163 - 1171, May 2007.
- [8] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Médard, and J. Crowcroft, "XORs in the air: Practical wireless network coding," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 16, pp. 497 - 510, June 2008.
- [9] S. Chachulski, M. Jennings, S. Katti, and D. Katabi, "Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing," in *Proc. of ACM SIGCOMM*, pp. 169 - 180, 2007.
- [10] X. Zhu, H. Yue, Y. Fang, and Y. Wang, "A batched network coding scheme for wireless networks," *ACM Wireless networks*, vol. 15, pp. 1152 - 1164, 2009.
- [11] H. Seferoglu and A. Markopoulou, "I²NC: intra- and inter-session network coding for unicast flows in wireless networks," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 1035 - 1043, Apr. 2011.
- [12] C. Qin, Y. Xian, C. Gray, N. Santhapuri, and S. Nelakuditi, "I²mix: integration of intra-flow and inter-flow wireless network coding," in *Proc. of SECON Workshops '08. 5th IEEE Annual Communications Society Conference*, pp. 1 - 6, June 2008.
- [13] J. K. Sundararajan, D. Shah, M. Medard, M. Mitzenmacher, and J. Barros, "Network coding meets tcp," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, pp. 280 - 288, Apr. 2009.
- [14] B. Radunovic, C. Gkantsidis, P. Key, and P. Rodriguez, "Toward practical opportunistic routing with intrasession network coding for mesh networks," in *Proc. of IEEE Transaction on Networking*, pp. 420 - 433, Apr. 2010.
- [15] F. Soldo, A. Markopoulou, and A. L. Toledo, "A simple optimization model for wireless opportunistic routing with intra-session network coding," in *Proc. Netcod 2010*, Toronto, ON, Canada, pp. 1 - 6, Jun. 2010.
- [16] D. P. Palomar and M. Chiang, "A tutorial on decomposition methods for network utility maximization," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 8, pp. 1439 - 1451, Aug. 2006.
- [17] X. Zhang and B. Li, "Optimized multipath network coding in lossy wireless networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 622 - 634, Jun. 2009.
- [18] H. Su and X. Zhang, "Modeling throughput gain of network coding in multi-channel multi-radio wireless ad hoc networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 27, pp. 593 - 605, June 2009.
- [19] D. P. Bertsekas, A. Nedic, and A. E. Ozdaglar, *Convex analysis and optimization*. Athena Scientific, 2003.
- [20] P. Brucker, *Scheduling algorithms*. Springer Verlag, 2007.
- [21] D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis, *Parallel and distributed computation: numerical methods*. Prentice-Hall, New Jersey, 1989.

 저 자 소 개



박 무 성(학생회원)
 2011년 아주대학교 전자공학부
 학사 졸업.
 2013년 아주대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 현재 LIG넥스원 연구원
 <주관심분야 : 무선네트워크, 이
 동통신>



윤 원 식(정회원)-교신저자
 1984년 서울대학교 제어계측
 공학과 학사 졸업.
 1986년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 석사 졸업.
 1991년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 박사 졸업.

1991년 금성전기 선임연구원
 1994년 LG정밀 책임연구원
 1995년 University of Victoria 방문교수
 2001년 콘텔라 CTO
 2007년 University of Florida 방문교수
 1994년 - 현재 아주대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : 이동통신, 무선네트워크>