

크리티컬한 응용을 위한 능동형 네트워크 최적화기

박봉상¹ · 박관근^{1*}

Proactive Network Optimizer for Critical Applications

Bongsang Park¹ · Pangun Park^{1*}

¹Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

요 약

최근 무선 네트워크는 사이버 물리 시스템 및 차세대 산업 자동화 시스템과 같은 크리티컬한 대형 응용 분야의 핵심 인프라가 되고 있다. 그러나, 무선 네트워크가 갖는 원천적인 링크 성능의 불확실성으로 인하여 전체 시스템의 안정성에 치명적 문제를 야기할 수 있다. 본 논문에서는 네트워크 내 링크의 실시간 상태 정보 없이 응용의 요구 성능을 만족시킬 수 있는 능동형 무선 네트워크 최적화기를 제시한다. 특히, 제시하는 능동형 최적화기는 네트워크 상에서 최대 k -개의 링크 결함이 발생하더라도 항상 성능을 보장할 수 있도록, 라우팅 경로와 트래픽 분산을 최적화하는 계층 교차적 방안이다. 시뮬레이션을 통하여, 제안된 능동형 네트워크 최적화기가 기존의 수동형 네트워크에 비하여 고강건성을 보장하는 것을 분석하였다. 또한, 능동형 네트워크는 수동형 네트워크의 주요 단점인 링크 상태 정보의 오류로 인한 성능 감쇄 및 네트워크 재구성과 같은 비용이 발생하지 않는다.

ABSTRACT

Recently, wireless networks are becoming an important infrastructure for the critical large-scale applications such as cyber-physical systems and next generation industrial automations. However, the fundamental performance uncertainty of wireless networks may incur the serious instability problem of the overall systems. This paper proposes the proactive network optimizer to guarantee the application demands without any real-time link monitoring information of the networks. In particularly, the proposed proactive optimizer is the cross-layer approach to jointly optimize the routing path and traffic distribution in order to guarantee the performance demand within a maximum k number of link faults. Through the simulations, the proposed proactive network optimizer provides better robustness than the traditional existing reactive networks. Furthermore, the proactive network does not expose to the major weakness of the reactive networks such as the performance degradation due to the erroneous link monitoring information and the network reconfiguration cost.

키워드 : 네트워크 최적화, 능동형 네트워크, 수동형 네트워크, 무선 메쉬 네트워크

Key word : Network Optimization, Proactive Networks, Reactive Networks, Wireless Mesh Networks

Received 9 July 2018, Revised 17 July 2018, Accepted 1 Aug 2018

* Corresponding Author Pangun Park(E-mail:pgpark@cnu.ac.kr, Tel:+82-42-821-6862)

Department of Radio and Information Communications Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.9.1250>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 무선 네트워크는 기존의 이동통신에서 벗어나 사이버 물리 시스템 및 차세대 산업 자동화 시스템과 같은 매우 크리티컬한 응용 분야의 핵심 기반 망으로 자리 잡고 있다[1, 2]. 이러한 응용 분야에서 정보 손실 및 지연은 시스템 전체의 안정성에 치명적인 문제를 야기할 수 있다. 따라서, 기존의 무선 네트워크를 단순히 이러한 응용에 적용하면 전체 시스템에 치명적인 문제를 야기할 수 있으며, 이를 해결할 수 있는 고강건 (High-robust) 무선 네트워크의 확보가 절실하다[3].

기존의 무선 메시 네트워크는 수집된 링크의 상태 정보를 통하여 문제가 발생 시 이를 감지하고, 이러한 정보에 기반하여 네트워크를 최적화한다[4]. 그러나, 이러한 수동형 네트워크는 평균 성능을 향상시킬 수 있는 반면 다양한 결함 요소에 노출될 수 있다. 만약 수집된 네트워크 상태 정보 및 제어 신호에 오류, 지연 및 손실이 발생하면, 크리티컬한 응용에 치명적인 문제를 야기할 수 있다. 이러한 수동형 네트워크의 약점은 네트워크의 크기가 커질수록 심각해질 수 있다.

본 논문에서는 네트워크의 실시간 상태 정보 없이 응용의 요구 성능을 보장하는 능동형 네트워크 최적화기를 제시한다. 제시하는 능동형 네트워크는 최대 k -개의 링크에 문제가 발생하더라도 항상 성능을 보장할 수 있도록, 라우팅 경로와 트래픽 분산을 동시에 최적화하는 계층 교차적 방안이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2장에서는 네트워크 모델 및 가정을 기술한다. 제 3장에서는 전체적인 능동형 네트워크 최적화기의 구조 및 각 계층별 핵심 기술에 대해 살펴보고, 제 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 성능을 비교 분석한다. 마지막으로, 제 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 네트워크 모델

네트워크 토폴로지는 방향성 그래프 $G = (V, E)$ 로 모델링되며 V 는 노드 셋, E 는 링크 셋을 의미한다. 다수의 네트워크 플로우 셋 $f \in \mathbf{F}$ 은 각 소스 노드와 목적 노드로 구성되며, 각 플로우의 트래픽 요구 R_f 가 주어진다.

무선 네트워크의 불완전 링크 성능을 극복할 수 있도록, 각 플로우는 단일 라우팅 경로가 아닌 P_f 개의 다수 라우팅 경로를 통하여 트래픽을 전송한다. 각 라우팅 경로가 어떠한 링크도 공유하지 않는 완전히 분리된 라우팅 경로의 경우 하나의 링크 결함은 하나의 라우팅 경로에만 영향을 미친다. 그러나, 일반적인 무선 네트워크의 경우 노드 및 링크의 제약으로 인하여 이러한 다수의 라우팅 경로는 부분적으로 링크를 공유해야 한다. 본 논문에서는 플로우에 할당된 P_f 개의 라우팅 경로 중 최대 m_f 개 경로가 네트워크 내 링크를 공유하는 m_f 분리 라우팅 경로를 가정한다. 즉, 한 개의 링크 결함이 최대 m_f 개의 라우팅 경로에 영향을 줄 수 있으며, 완전히 분리된 라우팅 경로는 m_f 값이 1이 된다.

각 노드는 라우팅 경로가 결정되면 송신기/수신기를 고려하여 방향성 안테나의 빔을 조정한다. 본 논문에서는 이상적 안테나 패턴을 사용한다[5]. 이러한 안테나 패턴을 고려하여 기존의 연구에서는 충돌 그래프를 추출하고, 관련 링크의 용량을 분석한다[6, 7]. 본 논문에서는 각 링크의 정적 링크 용량을 가정한다.

네트워크 링크의 결함은 무선 채널의 페이딩 및 임베디드 하드웨어의 결함 등으로 발생할 수 있으며, 이를 예측하고, 제어하는 것은 현실적으로 많은 기술적 한계를 갖는다.[8, 9] 본 논문에서는 이러한 링크 결함이 짧은 시간 내에 발생하며, 특정 링크가 아닌 랜덤하게 발생한다고 가정한다. 또한, 동시에 발생할 수 있는 최대 링크의 결함은 k 로 가정한다. 따라서, 네트워크 상에서 발생할 수 있는 링크 결함의 총 경우의 수는 $\sum_{i=1}^k \binom{E}{i}$ 으로 매우 크며, 현실적으로 각 경우를 모두 고려하는 것은 불가능하다.

III. 능동형 네트워크 최적화기

3.1. 핵심 기술

능동형 네트워크 설계의 가장 큰 문제점은 발생 가능한 링크 결함의 경우의 수가 매우 많다는 것이다. 특히, 이를 반영하여 최적화 문제를 도출할 시, 제약 조건이 폭발적으로 증가할 수 있다. 그러나, 수많은 링크 결함의 경우를 고려하더라도 재구성을 포함한 네트워크 내 제어 가능한 변수는 한정되어 있다. 즉, 링크 결함이

발생할 수 있는 최악의 경우를 고려하여 네트워크 자원을 할당하면 최대 k 개의 어떠한 링크 결함에도 요구 사항을 만족시킬 수 있다.

m_f 분리 라우팅 경로 조건을 고려하여 각 플로우에 P_f 개의 다수 라우팅 경로를 추출할 시 다수의 라우팅 경로는 링크를 공유할 수 있다. 네트워크 내 링크를 공유하는 다수의 라우팅 경로의 수에 따라 링크를 정리할 수 있다. 각 플로우의 m_f^i 는 i -번째로 많은 라우팅 경로가 링크를 공유하는 하는 것을 의미하며, 따라서 $m_f = m_f^1 \leq P_f$ 이다. 최대 k 개의 링크 결함이 발생할 시 최소 생존 가능한 라우팅의 수는 다음과 같다.

$$\tau_f = P_f - \sum_{i=1}^k m_f^i \leq P_f - k m_f \quad (1)$$

그러나 최악의 경우를 고려하는 식 (1)의 경우 최소 생존 가능한 라우팅의 수는 음의 값일 수 있으며, 이로 인하여 최적화 문제의 제약 조건이 해를 찾을 수 없는 불가능한 문제가 된다. 이러한 취약점을 극복할 수 있도록 네트워크 보호 강도를 $\eta = \sum_{i=j}^{k+j} m_f^i / \sum_{i=1}^k m_f^i$ 과 같이

정의한다. 즉, 분모는 가장 높은 1부터 k 개까지의 m_f^i 의 합으로 k 개의 링크 결함이 줄 수 있는 최대 라우팅 경로의 손실 수를 의미한다. 이에 반하여 분자는 k 개의 링크 결함이 최대 손실 값인 m_f 이 아닌, m_f^j 로 주어져 상대적으로 약한 링크 결함의 경우를 의미한다. $j = 1$ 이면, 보호의 강도가 $\eta = 1$ 이 되며 기존의 방식과 같이 최악의 링크 결함까지 포함한다.

네트워크 보호 강도 η 를 식 (1)에 적용하면, 최소 생존 가능한 라우팅의 수는 다음과 같다.

$$\tau_f = P_f - \eta \sum_{i=1}^k m_f^i \geq \tau_f \quad (2)$$

따라서, 보호 강도 η 를 조절하여 최소 생존 가능한 라우팅의 수를 제어할 수 있다. 보호 강도를 증가시킬수록 최소 성능이 향상되어 강건성을(Robustness) 확보할 수 있는 반면, 최소 생존 가능한 라우팅의 수가 음수가 되면 어떠한 트래픽도 전송할 수 없다.

3.2. 전체 구조

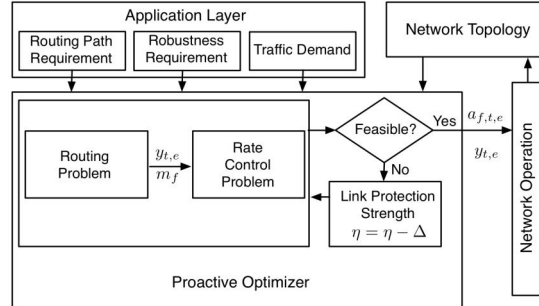


Fig. 1 Overall Structure of Proactive Optimizer

그림 1은 능동형 네트워크 최적화기의 전체적인 구조를 표현한다. 응용 계층에서 각 플로우의 트래픽 요구 사항 및 강건성 요구 사항을 정의하며, 네트워크 토폴로지 정보와 함께 최적화 모듈에 입력으로 들어간다. 최적화 엔진은 크게 3개의 모듈인 라우팅 모듈, 전송률 제어 모듈, 보호 강도 적응 모듈로 구성된다. 라우팅 모듈의 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\min_{f \in \mathbf{F}} \max_{f \in \mathbf{F}} m_f \quad (3.a)$$

$$\sum_{e_i \in \mathbf{I}_v} y_{t,e_i} - \sum_{e_j \in \mathbf{O}_v} y_{t,e_j} = 0 \quad (3.b)$$

$$\sum_{t \in P_f} y_{t,e} \leq m_f \quad \forall e \in \mathbf{E}, f \in \mathbf{F} \quad (3.c)$$

여기에서 $y_{t,e} \in \{0, 1\}$ 는 결정 변수로서 특정 라우팅 경로가 링크를 사용하면 1을 아니면 0의 값을 갖는다. 목적 함수(3.a)는 각 플로우 내 라우팅 경로 간의 m_f 값의 최댓값을 최소화한다. 제약 조건 (3.b) 네트워크 노드의 입력 \mathbf{I}_v / 출력 \mathbf{O}_v 링크 간 총량 보존의 법칙을 의미한다. 마지막으로 (3.c)는 m_f 링크 분리된 라우팅 경로의 제약 조건이다.

전송률 제어 선형 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\max_{f \in \mathbf{F}} \min_{f \in \mathbf{F}} \delta_f \quad (4.a)$$

$$\sum_{t \in P_f} a_{f,t,e} y_{t,e} \geq R_f + \delta_f \quad (4.b)$$

$$P_f = \{t | t \in P_f, |t| \leq \tau_f\}, f \in \mathbf{F} \\ \sum_{f \in \mathbf{F}, t \in P_f} a_{f,t,e} y_{t,e} \leq c_e \quad \forall e \in \mathbf{E} \quad (4.c)$$

$$\sum_{e_i \in \mathbf{I}_v} a_{f,t,e_i} y_{t,e_i} - \sum_{e_j \in \mathbf{O}_v} a_{f,t,e_j} y_{t,e_j} = 0 \quad (4.d)$$

여기에서 $a_{f,t,e}$ 는 플로우 f 의 라우팅 경로 t 가 링크 e 를 사용할 때의 전송률을 의미한다. 제약 조건 (4.b)는 식 (2)로부터 최소 생존 가능한 라우팅의 수가 주어지면, 플로우의 경로 중 τ_f 개의 조합을 추출하고, 모든 조합이 응용의 요구 트래픽 보다 커야 한다는 것을 의미한다. 제약 조건 (4.b)가 만족되면, 여분의 파라미터인 δ_f 가 0보다 같거나 크며, (4.a)의 목적 함수에서는 이러한 δ_f 의 최솟값이 최대화 될 수 있도록 한다. (4.c)는 링크를 사용하는 모든 경로의 전송률이 주어진 링크 용량 보다 작아야 하며, (4.d)는 노드의 트래픽 보존 법칙을 의미한다.

마지막으로, 보호 강도 적응 모듈은 최적화 문제의 제약조건이 모두 만족되지 않으면, 보호 강도 η 의 값을 점진적으로 감소시킨다. 초기 보호 강도는 $\eta=1$ 로 설정하여, 최적화 문제의 해가 보호 강도를 최대화 되도록 한다.

3.3. 트레이드오프

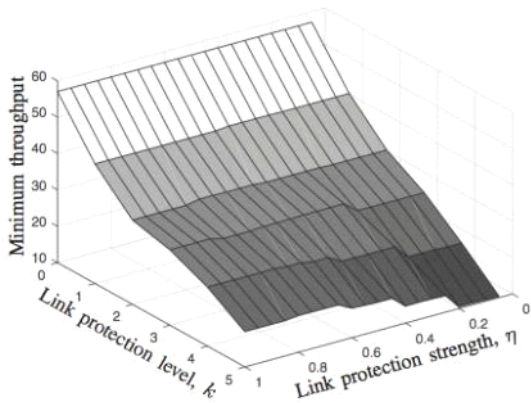


Fig. 2 Minimum throughput of the proactive network as a function of different link protection levels and the link protection strengths

몬테 카를로 시뮬레이션을 통하여 네트워크의 강건성과 수율의 트레이드오프를 분석한다. 시뮬레이션은 Matlab을 기반을 구현되었으며, 프로그램 내 최적화 툴을 사용하였다. 그림 2는 네트워크 내 플로우의 최소 수율을 다양한 최대 허용 가능한 링크 결함 수 k 와 보호 강도 η 에 따라 표현한다. 변수 k 값이 증가할수록,

더 많은 링크의 결함에 대하여 네트워크의 성능이 보장된다는 것을 의미한다. 그러나, k 값이 증가할수록 네트워크의 최소 수율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 식 (2)를 통하여 생존 가능한 라우팅 경로의 수가 감소하고, 따라서 식 (4.b)의 제약 조건이 엄격해지면서 발생한다. 즉, 최대 허용 가능한 링크 결함 수 k 에 따라 네트워크의 강건성과 수율 사이의 트레이드오프가 존재한다. 또한, 그림 2에서 보호 강도 η 의 값이 증가할수록, 최소 수율 및 강건성이 증가하는 것을 알 수 있다. 보호 강도를 증가시키는 것이 이상적이거나 이는 최적화 문제 해의 실현 가능성과 직결된다.

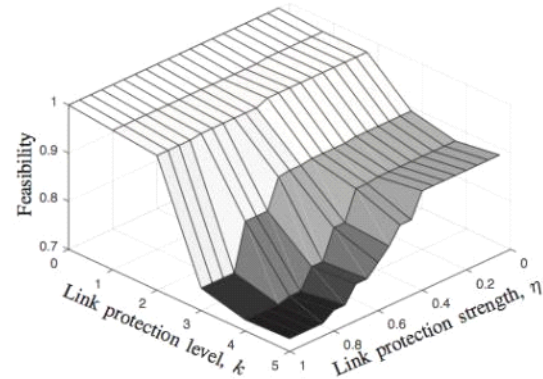


Fig. 3 Feasibility of the proactive network as a function of different link protection levels and the link protection strengths

이와 관련하여 그림 3은 500개의 랜덤 네트워크 토폴로지를 통하여 최적화 문제 해의 존재 확률을 다양한 최대 허용 가능한 링크 결함 수 k 와 보호 강도 η 에 따라 표현한다. 변수 k 와 η 값이 증가할수록 제약 조건 (4.b)가 엄격해져 최적해가 존재하지 않을 확률이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 그림 1의 능동형 네트워크 최적화기 내 보호 강도 적응 모듈이 제약 조건의 강도를 조절하여 최적화 문제의 해가 존재할 수 있도록 한다.

IV. 성능 분석

제시된 능동형 최적화기는 수동형 네트워크 관리기와 성능을 비교 분석한다. 수동형 네트워크는 링크 상

태 정보 및 제어 신호의 에러, 지연과 손실로 인하여 성능 저하가 발생하나, 최종적으로 실시간 링크 정보가 아닌 잘못된 제어가 적용되어 발생한다. 따라서, 수동형 네트워크의 경우 거짓음성(false negative) 링크를 적용하였다. 특정 링크가 거짓음성인 경우 실제로는 링크에 결함이 있으나, 이를 감지하지 못하고 정상으로 인지하는 것을 의미한다. 네트워크의 강건성을 분석하기 위하여, 다음과 같은 성능치를 정의한다.

$$\alpha_{pr} = \log \left(\frac{5\% \text{ Proactive Throughput}}{5\% \text{ Reactive Throughput}} \right) \quad (5)$$

성능치가 양의 값을 보이면, 낮은 수율인 5% 구간에서 능동형 수율이 수동형 수율보다 높다는 것을 의미한다. 변형된 성능치로 β_{pd} 는 5% 능동형 수율과 트래픽 요구 값 간의 로그로 정의하며, $\bar{\alpha}_{pr}$ 는 5% 능동형 수율과 최악의 거짓음성 링크가 발생했을 시의 5% 능동형 수율의 비를 로그로 취하였다.

25개의 노드가 150m x 150m 크기의 2차원 공간에 랜덤하게 전개된다. 총 플로우의 수는 4개이며, 플로우당 총 6개의 라우팅 경로가 설정된다. 각 셋업에서 500개의 몬테 카를로 시뮬레이션을 진행한다.

그림 4는 다양한 log-ratio 값인 β_{pd} , α_{pr} , $\bar{\alpha}_{pr}$ 를 트래픽 로드 $\lambda = 15, 20$ Mbps, 거짓음성 링크 수 $l_{en} = 0, 1$ 을 총 링크 결합 수 $k = 0, \dots, 4$ 에 따라 표현한다. 먼저 β_{pd} 의 값이 모든 링크의 결합 수에 상관없이 양의 값을 가지므로, 트래픽 요구 조건을 만족한다. 거짓음성 링크가 없는 $l_{en} = 0$ 인 경우 수동형 네트워크는 완벽한 링크 상태 정보를 사용하여 최적 해를 도출하고 이를 적용하므로, 이는 이상적인 네트워크 성능을 의미한다. 즉, 어떠한 네트워크도 이러한 성능을 보장하지 못하는 상계(Upper bound) 수율을 의미한다. $l_{en} = 0$ 일 때 α_{pr} 의 값은 항상 0보다 작아 수동형 네트워크의 성능이 우수한 것을 확인할 수 있으나, 링크 결합의 수가 2보다 작으면 손실률이 30% 미만을 보인다.

그림 2에서 설명하였듯, 허용 가능한 총 링크의 결합 값인 k 가 증가할수록 능동형 네트워크의 수율이 감소하는데 이는 생존 가능한 라우팅 경로 수가 감소하기 때문이다. 따라서, 허용 가능한 총 링크의 결합 값이 증가할수록 고강건성을 확보할 수 있으나, 네트워크의 수율이 감소하는 원천적 트레이드오프를 확인할 수 있다.

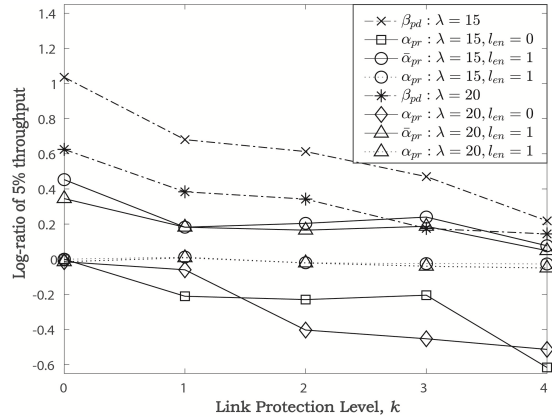


Fig. 4 Log-ratio of 5% throughput as a function of different link protection levels

$l_{en} = 1$ 일 때 활성화된 링크 중 랜덤하게 1개의 링크를 거짓음성 링크로 설정한다. $l_{en} = 1$ 일 때 α_{pr} 값을 확인하면 성능 차가 그리 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 그러나, 거짓음성 링크가 최소 트래픽을 갖는 특정 플로우에서 발생하면 치명적 문제를 야기할 수 있다. 즉, $\bar{\alpha}_{pr}$ 의 값에서 확인할 수 있듯 능동형 네트워크의 수율이 월등히 좋은 것을 확인할 수 있다. α_{pr} 와 $\bar{\alpha}_{pr}$ 사이 큰 차이는 거짓음성 링크의 위치에 따라 달라질 수 있으나, $\bar{\alpha}_{pr}$ 의 비교 성능이 상계치를 의미한다. 수동형 네트워크의 경우 거짓음성 링크의 위치에 무관한 성능을 보장하여, 고강건 성능을 보장한다.

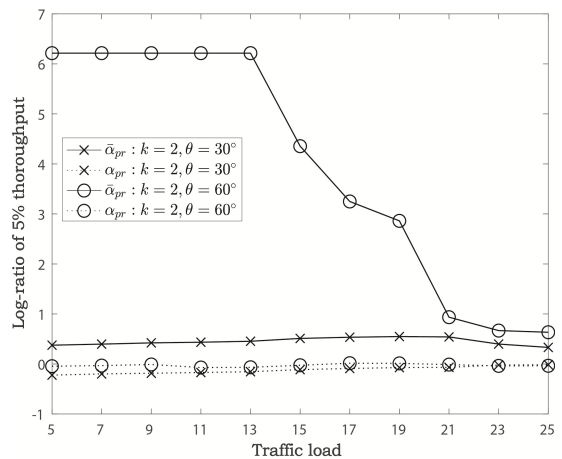


Fig. 5 Log-ratio of 5% throughput as a function of different traffic loads

그림 5는 log-ratio α_{pr} 와 $\bar{\alpha}_{pr}$ 의 값을 총 링크 결합 수 $k = 2, 3$, 거짓음성 링크 $l_{en} = 1$, 안테나 빔 폭 $30^\circ, 60^\circ$ 으로 고정하여, 다양한 트래픽 요구 사항 $R_f = 5, \dots, 25$ 에 따라 표현한다. 능동형 네트워크의 수율과 수동형 네트워크의 수율은 최대 비를 500으로 고정한다 (즉, $\alpha_{pr}, \bar{\alpha}_{pr} \leq 6.21$). 그림 5에서 확인할 수 있듯 트래픽의 요구 사항이 감소할수록 최대 $\bar{\alpha}_{pr}$ 의 값이 증가한다. 또한, 방향성 안테나의 빔 폭이 증가할수록 능동형 네트워크의 성능이 수동형 네트워크보다 향상되는 것을 확인할 수 있다. 안테나의 빔 폭이 증가할수록 주위 다른 라우팅 경로와의 간섭이 증가한다. 따라서, 수동형 네트워크의 경우 플로우에 할당된 다수의 라우팅 경로 간 트래픽 분산에 편차가 증가하는 문제를 야기한다. 만약 거짓음성 링크가 트래픽 전송률이 높은 특정 라우팅 경로에 발생하면, 특정 플로우의 트래픽이 급격하게 손실된다. 이에 반하여, 능동형 네트워크는 트래픽을 최대한 균등하게 분산하여 안테나 빔 폭에 좀 더 강건한 특성을 보인다.

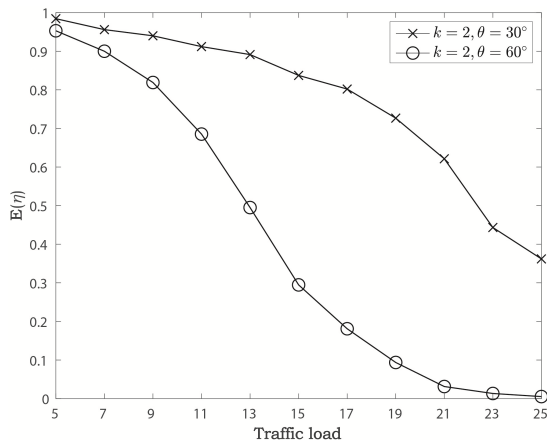


Fig. 6 Expected value of η as a function of different traffic loads

같은 셋업에서, 그림 6은 보호 강도 η 의 평균값 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 보호 강도는 트래픽의 요구 사항 및 안테나 빔의 폭이 증가할수록 감소한다. 식 (4.b)에서 확인할 수 있는 트래픽 요구 사항이 증가할수록 제약 조건이 엄격해져, 최적화 문제의 해가 존재하지 않게 된다. 따라서, 그림 1의 보호 강도 적응 모듈이 활성화되어, 보호 강도 η 를 감소시킨다. 또

한, 안테나 빔 폭이 증가할수록 간섭이 증가하여 각 링크의 전송 용량을 감소시킨다.

V. 결론

본 논문에서는 실시간 링크 상태 정보의 수집 및 적용 없이 응용의 요구 성능을 만족할 수 있는 능동형 네트워크 최적화기를 제시하였다. 제시한 능동형 최적화기는 네트워크 상에 최대 k 개의 링크 결합이 발생하더라도 요구 성능을 보장할 수 있도록, 라우팅 경로와 전송률을 최적화한다. 네트워크 강건성 분석을 위하여 몬테 카를로 시뮬레이션을 통하여, 제안된 능동형 네트워크 최적화기가 기존의 수동형 네트워크에 비하여 고강건성을 보장하는 것을 분석하였다. 향후 연구에서는, 제안된 능동형 최적화 모듈을 임베디드 네트워크에 구현할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation (NRF-2016R1C1B100 8049) funded by the Korean government.

REFERENCES

- [1] C. Lu et al., "Real-Time Wireless Sensor-Actuator Networks for Industrial Cyber-Physical Systems," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 1013-1024, May 2016.
- [2] P. Park, S. Coleri Ergen, C. Fischione, C. Lu and K. H. Johansson, "Wireless Network Design for Control Systems: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 978-1013, June 2018.
- [3] P. Park, J. Araujo and K. H. Johansson, "Wireless networked control system co-design," in *Proceedings of International Conference on Networking, Sensing and Control*, Delft, pp. 486-491, 2011.
- [4] P. Park, P. D. Marco and K. H. Johansson, "Cross-Layer Optimization for Industrial Control Applications Using Wireless Sensor and Actuator Mesh Networks," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 3250-3259, April 2017.

- [5] J. Wildman, P. H. J. Nardelli, M. Latva-aho and S. Weber, "On the Joint Impact of Beamwidth and Orientation Error on Throughput in Directional Wireless Poisson Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 12, pp. 7072-7085, Dec. 2014.
- [6] X. Zhou, Z. Zhang, G. Wang, X. Yu, B. Y. Zhao and H. Zheng, "Practical Conflict Graphs in the Wild," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, no. 3, pp. 824-835, June 2015.
- [7] H. Li, Y. Cheng, C. Zhou and P. Wan, "Multi-dimensional Conflict Graph Based Computing for Optimal Capacity in MR-MC Wireless Networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, Genova, pp. 774-783, 2010.
- [8] K. Praveen Kumar, "ESTIMATION OF TRAFFIC MANAGEMENT AND ROAD SAFETY," in *Asia-pacific Journal of Convergent Research Interchange*, HSST, ISSN : 2508-9080, Vol. 3, No. 2, pp. 21-28, June 2017.
- [9] P. Park "Optimized Medium Access Probability for Networked Control Systems," in *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 19, no. 10, pp. 2457-2464, Oct 2015.



박봉상(Bongsang Park)

2018년 2월 충남대학교 정보통신공학과 학사
2018년 3월 - 현재 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정
※관심분야 : 임베디드 시스템, 네트워크 시스템, 기계학습, 네트워크 보안



박관근(Pangun Park)

2005년 8월 아주대학교 전자공학부 학사
2007년 11월 Royal Institute of Technology 무선시스템공학과 석사
2011년 3월 Royal Institute of Technology 정보통신공학과 박사
2011년 3월~2011년 9월 Royal Institute of Technology 박사후 연구원
2011년 9월~2013년 8월 University of California, Berkeley 박사후 연구원
2013년 9월~2015년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원
2015년 3월~2016년 2월 경상대학교 정보통신공학과 조교수
2016년 3월~현재 충남대학교 전자정보통신공학과 조교수
※관심분야 : 무선 제어 네트워크, 사이버물리시스템, 네트워크 제어시스템