

레터논문 (Letter Paper)  
방송공학회논문지 제18권 제3호, 2013년 5월 (JBE Vol. 18, No. 3, May 2013)  
<http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2013.18.3.491>  
ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

## 기가빗 비디오 네트워크에서의 추계적 저전력 버퍼안정 라우팅

김 중 헌<sup>a)</sup>, 류 은 석<sup>b)‡</sup>

### Stochastic Low-Power and Buffer-Stable Routing for Gigabit Wireless Video Networks

Joongheon Kim<sup>a)</sup> and Eun-Seok Ryu<sup>b)‡</sup>

#### 요 약

본 논문은 60 GHz 채널을 사용하는 무선장치들이 멀티홉 애드혹 네트워크의 형태로 배치되어 있을 때에 일부 무선 장치들에서 발생한 비디오 트래픽을 에너지 효율적이며 버퍼가 안정적인 형태로 전달하는 동적/추계적 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 모든 장치가 정보를 공유할 필요 없이 분산적으로 운영이 되기 때문에 중앙에서 알고리즘을 운영하는 제어장치가 필요 없다. 제안하는 알고리즘에 대한 성능은 시뮬레이션을 통하여 검증되었다.

#### Abstract

This paper proposes a stochastic/dynamic routing protocol which aims the minimization of the summation of time average expected power expenditure with buffer stability in mobile ad-hoc 60 GHz wireless networks. By using 60 GHz RF, the wireless devices can transmit/receive 1080p HD video signals without compression. In addition, our algorithm works without centralized controller, so that the distributed operation is available. The novelty of the proposed algorithm was also verified by simulations.

Keyword : Stochastic Optimization, Gigabit Wireless Video Networks, 60 GHz, Routing, Buffer Stability

## 1. 서 론

최근 WirelessHD<sup>[1]</sup>와 Wireless Gigabit Alliance<sup>[2]</sup> 무선 네트워크 기술에 대한 산업표준 활동과 IEEE 802.11ad<sup>[3]</sup>와

IEEE 802.15.3c<sup>[4]</sup>등의 IEEE에서의 표준 활동을 통해서 알 수 있듯이 60 GHz 밀리미터파 연구가 활발히 진행되고 있으며 이를 통하여 1080p HD (high definition) 고화질 비디오를 압축하지 않고 실시간으로 전송할 수 있는 기가빗(Gigabit/s) 무선전송기술이 구현되었다. 위 기술은 향후 가전 분야에서 비디오관련 분야에 활발하게 상용화될 예정이다.

본 논문은 위와 같은 60GHz RF를 사용가능한 무선장치들이 모바일 애드혹 네트워크 형태로 배치되어 일부 장치에서 비디오 트래픽이 발생하는 환경에서, (1) 가장 전력을 적게 쓰게 할 뿐 아니라, (2) 각각의 무선장치 내의 비디오

a) Computer Science Department, University of Southern California

b) Innovation Labs, InterDigital Communications

‡ Corresponding Author : 류은석(Eun-Seok Ryu)

E-mail: esryu@gatech.edu

Tel: +1-404-434-3752

· Manuscript received January 14, 2013 Revised May 6, 2013 Accepted May 6, 2013

버퍼가 오버플로우(overflow)되지 않고 안정되도록, 해당 트래픽을 목적지까지 전달하는 라우팅 기법을 제안한다.

본 트래픽 기반의 멀티홉 라우팅 기법은 Backpressure Routing이라는 이름으로 많은 연구가 진행되어 있으며 많은 파생 연구를 생산하고 있다<sup>[5]</sup>. 그러나 현재까지 멀티홉 비디오 전송이나 60 GHz 비디오 전송에는 적용된 논문이 없으므로 본 논문에서는 이에 대해서 논의하고자 한다.

### II. 참조 네트워크 모델

네트워크 시스템 모델은 60 GHz 기가빗 RF를 가지는 무선장치들이 MANET형식으로 존재한다. 따라서 특정 노드가 존재하면 그 노드를 향해서 데이터를 전송할 수 있는 다수의 이전 홉(previous hop) 노드가 있고 더불어 해당 노드가 데이터를 보내고자하는 다수의 다음 홉(next hop) 노드가 존재한다. 더불어 무선장치들은 모두가 비디오 트래픽을 가지는 것이 아니라 비디오 신호를 처리할 수 있는 디바이스들만 비디오 트래픽을 가진다. 본 논문에서 고려하는 시스템은 이러한 주어진 상황에서 비디오 트래픽을 가지는 무선장치들에게서 비디오 신호가 생성되었을 때에 그 신호가 멀티홉 라우팅을 수행하여 최종 목적지까지 전달되는 것을 목표로 하며 (1) 에너지 효율성과 (2) 버퍼의 안정성을 함께 추구한다. 에너지 효율성이 중요한 이유는 일반적인 MANET은 무선장치들이 AC전원을 가지고 있지 않기 때문에 배터리로 에너지를 공급받기 때문이다. 버퍼의 안정성이 중요한 이유는 오버플로우가 발생할 경우에 버려지는 (tail-drop) 데이터는 비디오 정보 손실로 연결되어 비디오 정보의 질을 떨어뜨리기 때문이다.

### III. 분산 동적 버퍼링 기반 라우팅

$N$ 개의 노드가 주어져 있으며 각 노드  $n_i, i \in \{1, \dots, N\}$ 가 가지는 버퍼의 동적인 변화는 다음과 같이 수식화 된다.

$$B_i(t+1) = \max\{B_i(t) - \mu_i^*(t), 0\} + \lambda_i^*(t) \quad (1)$$

위에서  $i \in \{1, \dots, N\}$ 이며  $t$ 는 단위시간이며 0부터 시

작하는 정수이다.  $B_i(t)$ 는  $t$ 에서 버퍼의 점유된 양을 나타낸다.  $\mu_i^*(t)$ 와  $\lambda_i^*(t)$ 는 출력 과정(departure process)과 입력 과정(arrival process)을 의미하며 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{cases} \mu_i^*(t) = \sum_{j \in S_i^{\neq xt}} \mu_{i \rightarrow j}(t) \\ \lambda_i^*(t) = \sum_{k \in S_i^{prev}} \lambda_{k \rightarrow i}(t) \end{cases} \quad (2)$$

위의 식에서  $S_i^{\neq xt}$ 와  $S_i^{prev}$ 는  $i$ 노드의 다음 홉 노드들의 집합과 이전 홉 노드들의 집합을 의미한다. 위의 식에서  $\mu_{i \rightarrow j}(t)$ 는  $i$ 노드에서  $j$ 노드( $S_i^{\neq xt}$  집합의 원소 중 하나)로의 출력과정을 의미하며 이는 샤논 채널 용량 법칙(Shannon Capacity)에 근거하여 다음의 식으로 표현이 된다.

$$\mu_{i \rightarrow j}(t) = B \cdot \log(1 + P_{i \rightarrow j}(t)) \quad (3)$$

위의 식에서  $B$ 는 채널의 대역폭을 의미하고  $\log(\cdot)$ 은 자연로그를 의미하며  $P_{i \rightarrow j}(t)$ 은 시간  $t$ 에서  $i$ 노드에서  $j$ 노드로의 데이터 전송을 위한 전력 할당량을 의미한다. 위  $P_{i \rightarrow j}(t)$  값은 상한값과 하한값을 가지며  $P_{max}$ 와  $P_{min}$ 으로 표현된다.  $\lambda_{k \rightarrow i}(t)$ 는  $k$ 노드( $S_i^{prev}$  집합의 원소 중 하나)에서  $i$ 노드로의 입력과정을 의미한다. 각각의 노드는 두 가지 종류의 입력과정이 존재한다. 하나는 자신의 노드에서 발생한 전송해야할 비디오 데이터이고 다른 하나는 이전 홉 노드들로부터 수신한 데이터이다. 처음 입력과정인 자신의 노드( $i$ 노드)에서 발생한 전송해야할 비디오 데이터의 양은  $v_i(t)$ 으로 표현되고 두 번째 입력과정인 이전 홉 노드들로부터 수신한 데이터는  $\sum_{k \in S_i^{prev}} \mu_{k \rightarrow i}(t)$ 으로 표현된다. 여기에

서 버퍼가 안정하다(rate stable)는 것은 버퍼에 오버플로우가 발생하지 않는다는 것을 의미한다.

제안하는 기법은 모든 노드에서의 시간 평균 예상 전력 소모 총합 최소를 목적으로 하므로 목적식은 다음과 같다.

$$\min : \sum_{i=1}^N \overline{P_i} \quad (4)$$

제약식은 (i) 버퍼들은 모두 안정적(rate stable)이어야 한

다는 것과 (ii) 모든 전력할당은 하한값과 상한값 사이에서 결정된다는 것이다( $P_{\min} \leq P_{i \rightarrow j}(t) \leq P_{\max}$ ). 더불어 위의 목적식에서  $\bar{P}_i$ 는 다음의 과정으로 유도된다.

$$\bar{P}_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} P_i(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} \sum_{j \in S_i^{ext}} P_{i \rightarrow j}(\tau) \quad (5)$$

위의 주어진 목적식과 [5]에 근거하여 제안하는 추계적 알고리즘은 다음과 같다. 매 단위시간  $t \in \{0, 1, 2, \dots\}$ 마다  $i$ 노드( $i \in \{1, \dots, N\}$ )는 현재 자신의 버퍼가 어느 정도 점유되어있는지를 확인한 후(즉  $B_i(t)$ 를 확인한 후) 다음의 식에 근거하여  $P_{i \rightarrow j}(t)$  값을 결정한다.

$$\min : \delta \sum_{i=1}^N \bar{P}_i + \sum_{i=1}^N B_i(t) [\lambda_i^*(t) - \mu_i^*(t)] \quad (6)$$

본 식의  $P_{i \rightarrow j}(t)$  값은  $P_{\min} \leq P_{i \rightarrow j}(t) \leq P_{\max}$ 을 만족한다.  $\delta$ 는 임의의 양수이며 시스템 설계자가 설정하는 값이다.  $\delta$  값이 클수록 전력소모의 최소화에 좀 더 가중치를 두는 알고리즘이 될 것이다.  $\sum_{i=1}^N B_i(t) [\lambda_i^*(t) - \mu_i^*(t)]$  부분은 다음의 식으로 정리된다.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j \in S_i^{ext}} \mu_{i \rightarrow j}(t) (B_j(t) - B_i(t)) + \sum_{i=1}^N B_i(t) v_i(t) \quad (7)$$

본 식에서  $\sum_{i=1}^N B_i(t) v_i(t)$  부분은 삭제가 가능하며 이는 실제 제어하는 의사결정파라미터인  $P_{i \rightarrow j}(t)$  값에 독립적인

부분이기 때문이다. 본 식에서  $v_i(t)$ 는  $i$ 노드에서 발생한 비디오 트래픽 값이다(i.i.d. random event). 결과적으로 본 추계적 알고리즘은 다음과 같이 갱신된다.

$$\min : \sum_{i=1}^N \left( \delta \bar{P}_i + \sum_{j \in S_i^{ext}} \mu_{i \rightarrow j}(t) (B_j(t) - B_i(t)) \right) \quad (8)$$

본 식의  $P_{i \rightarrow j}(t)$  값은  $P_{\min} \leq P_{i \rightarrow j}(t) \leq P_{\max}$ 을 만족하는 한도에서 결정된다. 또한 위의 식은 각 노드마다 분리가능(separable)하다. 왜냐하면 각 노드에서 해당하는 식을 최소화하면 이의 총합 또한 전체 목적식을 최소화하기 때문이다. 그러므로 결과적으로 세부 알고리즘은 다음과 같이 동작한다. 먼저 각 노드마다 매 단위시간  $t \in \{0, 1, 2, \dots\}$ 마다 자신의 버퍼의 점유상태(즉  $B_i(t)$ )를 파악한 후 다음의 식을 최소화하는  $P_{i \rightarrow j}(t)$  값을 구한다 ( $P_{\min} \leq P_{i \rightarrow j}(t) \leq P_{\max}$ ).

$$\delta P_{i \rightarrow j}(t) + \mu_{i \rightarrow j}(t) (B_j(t) - B_i(t)) \quad (9)$$

위 식의 최소값을 구하기 위하여 먼저 위 식을  $P_{i \rightarrow j}(t)$ 로 미분한 후에 해당 미분한 식을 0으로 만드는  $P_{i \rightarrow j}(t)$ 을 찾는다. 따라서 다음의 식은 최적의  $P_{i \rightarrow j}(t)$  값을 의미한다.

$$P_{i \rightarrow j}^*(t) = \frac{B}{\delta} (B_i(t) - B_j(t)) - 1 \quad (10)$$

따라서 최종적으로  $P_{\min} \leq P_{i \rightarrow j}(t) \leq P_{\max}$ 을 만족하는 최적의  $P_{i \rightarrow j}(t)$  값은 다음과 같다.

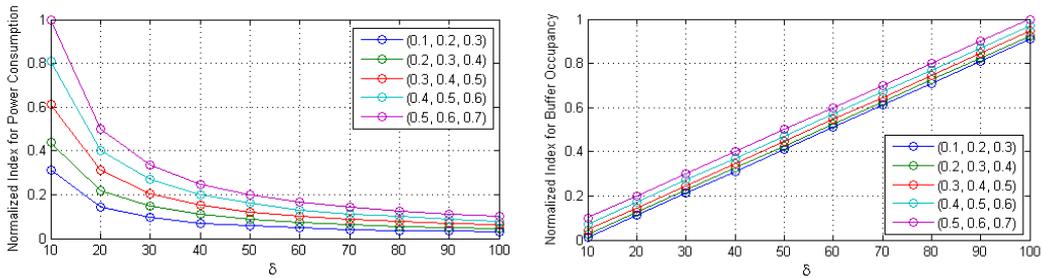


그림 1. 전력 소모 측정 결과 및 버퍼의 점유율에 대한 성능 평가  
 Fig. 1. Performance Evaluation for Power Consumption and Buffer Occupancy

$$P_{i \rightarrow j}^{\dagger}(t) = \min[\max\{P_{i \rightarrow j}^{\dagger}(t), P_{\min}\}, P_{\max}] \quad (11)$$

따라서  $t \in \{0, 1, 2, \dots\}$ 마다 현재 버퍼 점유  $B_i(t)$ 와 다음 홉 버퍼 점유  $B_j(t)$ 를 안다면  $P_{i \rightarrow j}^{\dagger}(t) = \frac{B}{\delta}(B_i(t) - B_j(t)) - 1$ 와  $P_{i \rightarrow j}^{\dagger}(t) = \min[\max\{P_{i \rightarrow j}^{\dagger}(t), P_{\min}\}, P_{\max}]$ 를 통하여 최적의 전력할당량을 분산적으로 계산할 수 있다.

#### IV. 성능 평가

본 논문의 성능평가로서 각 노드마다 주어진 비디오 트래픽 발생률 따른 전력 소모와 버퍼 안정성을 측정하였다. 본 성능 평가에서는 총 9개의 노드를 임의로 배치하였고 이 중 3개의 노드가 비디오 트래픽을 가지고 나머지 6개의 노드에서는 라우팅 기능만을 수행한다.

위와 같은 배치에서  $\delta$ 값에 따른 실험 결과는 다음의 두 그림과 같다.  $\delta$ 값은 [식 6]에서 보는 바와 같이 최소화하고자 하는 목적식의 값의 가중치를 의미한다. 본 [식 4]는 [식 6]에서의 목적식을 의미하며 전력 소모를 최소화 하려 한다. 따라서  $\delta$ 가 클수록 원하는 목적식에 좀 더 많은 가중치를 가지게 된다.  $\delta$ 가 작다면 [식 6]에서  $\delta$ 의 영향을 받지 않는  $\sum_{i=1}^N B_i(t) [\lambda_i^*(t) - \mu_i^*(t)]$ 에 더 가중치를 주게 되며 이는 버퍼 안정화 상태를 의미한다. 결과적으로 큰  $\delta$ 를 가질수록 [식 4]와 [식 6]에 근거하여 전력 소모의 최소화를 위하여 알고리즘이 동작할 것이며 반대로  $\delta$ 가 작아질수록 버퍼의 안정화 상태를 유지하기 위하여 알고리즘이 동작할 것이다.

위의 성능 평가에서 x축은  $\delta$ 값의 변화를 나타내며 y축은 전력 소모와 버퍼 안정화의 상대값을 나타낸다. 상대값은 최대의 전력을 소모했을 경우와 최대로 버퍼를 점유했을 경우를 시뮬레이션으로 도출한 후에 그 값을 1로 정규화하여 도출하였다. 위의 성능평가에서 좌측 그래프에서 보는 바와 같이 3개의 노드의 트래픽이 낮을 때 (최저는 (0.1, 0.2, 0.3))보다 높을 때(최대는 (0.5, 0.6, 0.7))에 비해서 낮은 전력 소모를 가지며 이는 보내야하는 데이터 량이 적기 때문이다. 더불어  $\delta$ 값이 클수록 더 낮은 전력소모를 가지며 이는  $\delta$ 값이 클수록 전력소모의 최소화에 더 많은 가중치를

주는 알고리즘으로 설계되기 때문이다. 우측 그래프에서 보는 바와 같이 트래픽이 낮을 때에는 더 낮은 버퍼 점유율을 가지며 이는 실제 전송되는 비디오 량이 적기 때문이다. 또한  $\delta$ 이 클수록 버퍼 점유율은 선형적으로 높아지는 경향이 있는데 이는 전력 소모의 최소화에 더 큰 가중치가 있으므로 버퍼의 안정성은 적은 비중으로 고려되기 때문이다.

본 논문에서 제시하는 멀티홉 라우팅 논문은 AODV, DSR, ZBR과 같은 정적 멀티홉 라우팅과는 다른 버퍼의 상태를 기반으로 하여 동적으로 동작하는 Backpressure Routing을 기반으로 한다. 따라서 기존의 정적 멀티홉 라우팅에 비해서 버퍼의 오버플로우 상태를 적극적으로 피할 수 있으며 이는 QoS보장 측면에서 명백한 이득을 가진다.

#### V. 결론

본 논문에서는 60 GHz 채널을 사용하는 무선장치들이 멀티홉 애드혹 네트워크의 형태로 존재할 때 일부 무선장치들에서 발생한 비디오 트래픽을 에너지 효율적이며 버퍼가 안정적인 형태로 목적지로 전달하는 추계적 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 모든 장치가 정보를 공유할 필요 없이 분산적으로 최적의 전력소모량을 할당하는 형태로 운영이 되기 때문에 중앙에서 알고리즘을 운영하는 제어장치가 필요하지 않는 이점이 있다. 제안하는 알고리즘에 대한 성능은 시뮬레이션을 통하여 검증되었으며 추후에는 좀 더 다양한 환경에서 검증할 예정이다.

#### 참고 문헌

- [1] J.M. Gilbert, C.H. Doan, S. Emami, C.B. Shung, A 4-Gbps Uncompressed Wireless HD A/V Transceiver Chipset, IEEE Micro, 28(2):56-64, 2008.
- [2] C.J. Hansen, WiGiG: Multi-Gigabit Wireless Communications in the 60 GHz Band, IEEE Wireless Communications, 18(6):6-7, 2011.
- [3] E. Perahia, C. Cordeiro, M. Park, L.L. Yang, IEEE 802.11ad: Defining the Next Generation Multi-Gbps Wi-Fi, Proc. of the IEEE Consumer Communications and Networking Conf. (CCNC), 2010.
- [4] H. Singh, S.-K. Yong, J. Oh, C. Ngo, Principles of IEEE 802.15.3c: Multi-Gigabit Millimeter-Wave Wireless PAN, Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN), 2009.
- [5] M. J. Neely. Stochastic Network Optimization with Application to Communication and Queueing Systems. Morgan & Claypool, 2010.