

IEEE 802.15.4의 충돌 회피 프로토콜 성능 분석을 위한 수학적 접근

Performance Analysis of Collision Avoidance Protocols in IEEE 802.15.4

박우진*, 박홍성**
(Woo-Jin Park, Hong-Seong Park)

Abstract - IEEE 802.15.4 is a standard designed for low rate wireless personal area networks(LR-WPANs). This paper presents the analytical model for to derive the saturation throughput of collision avoidance protocol of IEEE 802.15.4 in ad hoc network. we assume that nodes placed according to a two-dimensional Poisson distribution.

Key Words :IEEE802.15.4, Performance, Collision Avoidance, saturation throughput

1. 서론

IEEE 802.15.4는 무선 네트워크의 MAC 계층과 물리계층 프로토콜에 관한 표준이다. 이 논문은 IEEE 802.15.4 충돌 회피 프로토콜의 포화 처리량(saturation throughput)을 구하기 위한 분석적 모델을 제시한다. 이 논문에서 사용하는 분석 방법은 Yu Wang and J.J. Garcia-Luna-Aceves의 논문 [1]과 유사하다. 이 논문에서 IEEE 802.15.4의 충돌 회피 기법의 포화 처리량(saturation throughput)을 구하기 위해 간단한 모델을 제시하였다. 이 네트워크 모델의 노드들은 밀도가 λ 인 2차원 포아송 분포에 따라서 배치되어 있고 각 노드는 확률 p 로 각 시간 슬롯에 대해서 독립적으로 전송할 준비가 되어있다고 가정한다.

2절에서는 이 논문에서 다룬 IEEE802.15.4의 매체 접근 방법에 대해서 알아보고, 3절에서는 IEEE 802.15.4의 네트워크 성능을 추측하기 위한 throughput을 구한다. 그리고 4절에서 결론을 맺는다.

2. 근접 분석

IEEE 15.4의 frame 전송은 응답이 있는 전송과 응답이 없는 전송의 두 가지 방식으로 나뉘어져 있다. 이 논문에서는 응답이 있는 전송만을 간주한다.

2.1 가정

IEEE 802.15.4 프로토콜 네트워크 모델의 노드들의 분포는 2차원 포아송 분포(Poisson Distribution)에 따르도록 한다. 즉, 영역 S 내에 i 개의 노드가 있을 확률 $p(i, S)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.
$$p(i, S) = \frac{(\lambda S)^i}{i!} e^{-\lambda S}$$

각 노드의 송신 범위와 수신 범위가 같고, 이 송·수신 범위는 반지름이 R 인 원형이라고 가정한다. 이 영역 안에 속하는 평균 노드의 수를 $N=\lambda\pi R^2$ 을 구할 수 있다. 각 시간 슬롯의 길이를 τ 로 나타낸다. 성능 분석을 쉽게 하기 위하여 LongFrame, ShortFrame, ACK 패킷의 전송 시간을 τ 에 정

규화 시켰다. 각각에 대해서 $I_{LongFrame}$, $I_{ShortFrame}$, I_{ack} 로 나타내기로 한다. 이렇게 하면 τ 는 간단하게 1로 정규화할 수 있다.

노드들은 항상 전송할 패킷을 내부 버퍼에 가지고 있다고 가정한다. 이들 중 idle 노드는 각 시간 슬롯에 대해서 확률 p 로 전송할 준비가 되어있다고 가정한다. 여기서 p 는 특정 프로토콜에 대한 매개변수로 시간 슬롯에 독립적이다. 해당하는 프로토콜의 충돌회피 기법과 채널의 현재 상태에 따라서, 전송할 패킷을 가지고 있는 노드라도 그 슬롯에서 패킷을 전송할 수도 있고 전송하지 않을 수도 있기 때문이다. 그러므로 p 로 네트워크의 성능을 분석하는 것보다 실제로 특정 시간 슬롯에서 패킷을 '전송하는' 확률에 관심을 가지는 것이 더 낫다. Yu Wang와 J.J Garcia-Luna-Aceves [1]와 같이 분석이 간단해질 수 있도록 시간 슬롯에 독립적인 p' 를 다음과 같이 정의한다.

$$p' = p \text{Prob}\{\text{한슬롯에서 채널이 빈것으로감지됨}\} \approx p \Pi_1$$

Π_1 은 차후에 구하기로 한다.

p 와 p' 의 관계는 정확하게 분석할 필요가 없다. 프로토콜의 처리량(throughput)이 대부분 p' 에 의해 영향을 받기 때문이다[3]. 그림 3과 같은 Markov Chain 모델을 구상한 이유는 p 와 p' 의 관계를 간략하게 얻어내기 위함이다. 우리는 채널 모델을 간단히 만들기 위해서 다음과 같은 가정을 두기로 한다. 첫째는 채널이 원형이라고 가정하는 것이다.

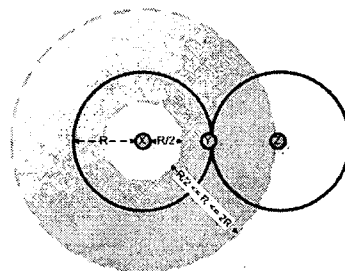


그림 2 R'의 범위

두 번째는 송수신 영역 외부의 노드들 때문에 영역 내부의 노드들의 응답확인(Handshake)이 실패할 수 있다고 여기는 것인데, 그것이 영역 내부의 노드들의 채널 유용성에 직접적으로 영향을 미치기 때문이다. 노드 x의 수신범위 내 노드들의 통신을 방해할 수 있는 hidden 노드가 존재할 수 있는 영역을 결정하는 것이다. 이 영역의 범위를 결정하는 반지름 R'은 R/2와 2R 사이에 존재한다. 따라서 모든 노드들이 서로 들을 수 있는 최대의 범위는 R'=R/2일 때이며 모든 이웃 노드들과 hidden 노드들은 R'=2R인 범위 내에 있다는 것을 알 수 있다. R'를 R'=aR로 표현하면, a의 크기는 0.5 ≤ a ≤ 2이다[3].

2.2 채널 상태 모델

위의 가정들을 기본으로 그림 3과 같은 채널 모델을 만들 수 있었다. IEEE 802.15.4[2]의 데이터 교환 방식에 따라 Short Frame과 Long Frame 상태를 구분하였다. idle 상태는 노드 x의 주변 채널이 idle로 감지되는 상태이다. 이때 채널이 idle 상태에 있을 시간간격이 τ가 된다. Success_L은 Long Frame의 전송이 성공적으로 진행이 된 상태이다. 이 논문에서는 IEEE 802.15.4의 채널 접근 방식 중에서 ACK가 있는 전송을 고려하므로 이 상태의 시간은 Long Frame과 Short Frame을 전송하고 ACK를 받기까지의 모든 시간을 포함한다. 다음과 같이 계산되어 질 수 있다.

$$T_{SuccsLong} = l_{SuccsLong} + \tau + l_{ack} + \tau = l_{SuccsLong} + l_{ack} + 2\tau$$

$$T_{SuccsShort} = l_{SuccsShort} + \tau + l_{ack} + \tau = l_{SuccsShort} + l_{ack} + 2\tau$$

Fail_S와 Fail_L은 데이터 프레임의 전송에서 충돌이 발생했을 때의 상태이다.

$$T_{FailLong} = l_{FailLong} + \tau, T_{FailShort} = l_{FailShort} + \tau$$

그림3의 Markov Chain에는 ACK의 충돌에 의한 상태를 고려하지 않았다. IEEE 802.15.4는 ACK 전송 시에는 이론적

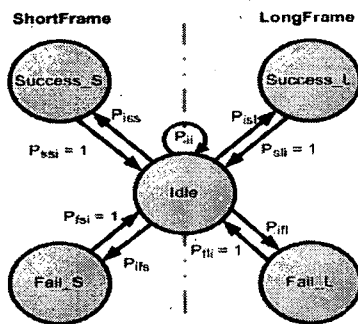


그림 3 노드 x 주위의 채널 상태에 대한 Markov chain 모델

으로 충돌이 발생하지 않는다.

이제 그림3의 Markov Chain의 상태전이확률(transition probability)을 계산하기 위한 식을 유도할 것이다. 대부분의 충돌 회피 알고리즘은 채널이 idle이 된 후 바로 전송하도록 되어있지 않다. 따라서 Success_L에서 idle로, Fail_L상태에서 idle로 또한 Short Frame의 경우도 idle로의 전이 확률은 반드시 1이다.

포아송 분포에 따라서, 노드 x의 수신 영역 R의 내부에 i 개의 노드가 있을 확률은 $e^{-N}N^i/i!$ 이고, 여기서 $N = \lambda\pi R^2$ 이

다. 따라서 채널을 공유하는 평균 노드의 개수 $M = \lambda\pi R^2 = \alpha^2 N$ 이다. 각 노드가 서로 독립적으로 전송을 한다고 가정하면, 모든 노드가 데이터를 전송하지 않을 확률은 $(1-p')^i$ 이고 여기서 $(1-p')$ 은 한 개의 노드가 한 시간 슬롯에서 데이터를 전송하지 않을 확률이다. P_{ii} 는 채널이 idle 상태일 때 x의 이웃 노드들이 아무도 전송을 하지 않을 확률이다. 따라서 P_{ii} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{ii} = \sum_{i=0}^{\infty} (1-p')^i \frac{M^i}{i!} e^{-M} = e^{-p'M}$$

상위계층에서 Long Frame을 구성할 만큼의 데이터를 전송할 확률을 P_i^u 라고 하고 Short Frame을 구성할 만큼의 데이터를 보낼 확률을 P_s^u 라고 정의를 하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다. $P_i^u + P_s^u = 1$ ----- ①

식 ①을 이용하여 P_{isl} 과 P_{iss} 를 구할 수 있다. 아래 식에서 P_s 는 특정 시간 슬롯에서 하나의 노드가 2-way handshake를 성공적으로 시작하는 확률이다.

$$P_{isl} = \sum_{i=1}^{\infty} P_i^u P_s (1-p')^{i-1} \frac{M^i}{i!} e^{-M}, P_{iss} = M e^{-p'M} P_s^u P_s$$

$$= M e^{-p'M} P_i^u P_s$$

위와 같은 식을 얻기 위해서, 포아송 분포의 무기역성 때문에 R'의 영역 내의 노드 개수의 분포가 노드 x의 존재에 영향을 받지 않는다는 사실을 이용한다. 이런 특징 때문에 P_s 는 아직까지 그 값을 알 수 없다. P_s 는 뒤에서 구할 것이다. P_{ifl} 과 P_{ifs} 은 각각 Long Frame과 Short Frame 전송시 충돌이 발생할 확률이다.

$$P_{ifl} = \sum_{i=2}^{\infty} P_i^u [1 - (1-p')^i - iP'(1-p')^{i-1}] \frac{M^i}{i!} e^{-M} = P_i^u [1 - (1 + Mp')e^{-p'M}]$$

$$P_{ifs} = \sum_{i=2}^{\infty} P_s^u [1 - (1-p')^i - iP'(1-p')^{i-1}] \frac{M^i}{i!} e^{-M} = P_s^u [1 - (1 + Mp')e^{-p'M}]$$

그림 3의 Markov Chain 모델의 각 상태 idle, Success_L, Success_S, Fail_L, Fail_S의 steady-state 확률을 각각 $\pi_i, \pi_{sl}, \pi_{ss}, \pi_{fl}, \pi_{fs}$ 로 표기하고 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\pi_i P_{ii} + \pi_{sl} + \pi_{ss} + \pi_{fl} + \pi_{fs} = \pi_i, \pi_i = \frac{1}{2 - P_{ii}} = \frac{1}{2 - e^{-p'M}}$$

노드 x 주위의 채널이 idle 상태로 감지될 long-run 확률 Π_l 은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\pi_i P_{isl} = \pi_{sl}, \pi_i P_{iss} = \pi_{ss}, \pi_i P_{ifl} = \pi_{fl}, \pi_i P_{ifs} = \pi_{fs} \text{라고 하면}$$

$$\Pi_l = \frac{T_{idle}}{T_{idle} + P_{isl}T_{sl} + P_{iss}T_{ss} + P_{ifl}T_{fl} + P_{ifs}T_{fs}}$$

이제 p'와 p의 관계를 구할 수 있다.

$$p' = \frac{p T_{idle}}{T_{idle} + P_{isl}T_{SuccsLong} + P_{iss}T_{SuccsShort} + P_{ifl}T_{FailLong} + P_{ifs}T_{FailShort}}$$

위의 수식에서 P_s 는 아직 결정되지 않았다.

3.3 노드의 상태 모델

노드 x에 대한 Markov chain 모델을 그림 5처럼 고안하였다. 그림 3의 채널에 대한 모델과 같으므로 각 상태에서 소모되는 시간 길이도 역시 같다. wait 상태에서 Succeed_Long 상태로의 전이확률 P_{wsl} 을 얻기 위해서 $P_{wsl}(t)$ 을 계산할 필요가 있다. $P_{wsl}(t)$ 은 전송 노드 x가 r만큼 떨어져 있는 노드 y와 성공적으로 데이터를 송신하고 응답을 받을 확률이다. $P_{wsl}(t)$ 을 구하려면 그림 4의 hidden 영역 B(r)에 대한 정의가

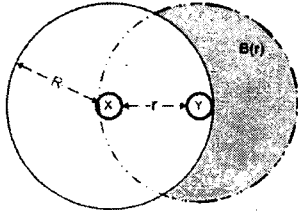


그림 4 'hidden' 영역

필요한데 [3]에 의해 다음과 같은 식으로 유도되었다.

$$B(r) = \pi R^2 - 2R^2 q\left(\frac{r}{2R}\right); \quad q(t) = \arccos(t) - \sqrt{1-t^2}$$

이제 $P_{wsl}(r)$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P_{wsl}(r) = P_1 P_2 P_3 P_4(r),$$

$$P_1 = \text{Prob}\{x \text{가 특정 slot에서 전송할 확률}\}$$

$$P_2 = \text{Prob}\{y \text{가 전송하는 시간 슬롯에서 전송하지 않을 확률}\}$$

$$P_3 = \text{Prob}\{x \text{의 수신 영역 } R \text{ 내에서 어떠한 다른 node도 그 슬롯에서는 전송을 시도하지 않을 확률}\}$$

$$P_4 = \text{Prob}\{B(r) \text{ 영역에 있는 노드가 } (2l_{LongFrame} + \tau) \text{ 동안 전송을 하기 않을 확률}\}$$

로 정의 내릴 수 있다. P_4 에서 $2l_{LongFrame} + \tau$ 는 충돌이 일어나기 쉬운 구간(vulnerable period)이다[1].

여기서, $p_1 = p'$, $p_2 = 1 - p'$ 이고,

$$P_3 = \sum_{i=0}^{\infty} (1-p')^i \frac{(\lambda \pi R^2)^i}{i!} e^{-\lambda \pi R^2} = e^{-p' \lambda \pi R^2}$$

$$P_4(r) = (p_1(r))^{2l_{LongFrame} + \tau} = e^{-p' \lambda B(r)(2l_{LongFrame} + \tau)}$$

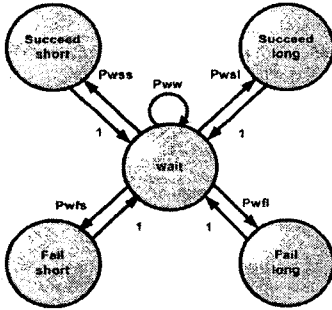


그림 5 노드의 Markov

Chain 모델

반지름이 r 인 범위 안에 있는 평균 노드 수는 r^2 에 비례하고 전송 노드가 동일한 확률로 자신의 이웃 노드 중에서 목적지 노드를 선택한다고 할 때, r 만큼 떨어져 있는 x 와 y 의 확률 밀도 함수는 $f(r) = 2r$, $0 < r < 1$ 이다. 여기서 $R=1$ 로 함으로써 R 에 대해 r 을 정규화하면 전이확률 P_{wsl} , P_{wss} , P_{ww} 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{wsl} = \int_0^1 2r P_{wsl}(r) dr = 2p'(1-p')e^{-p' \lambda \pi} \int_0^1 e^{-p' \lambda \pi [1 - 2q(\frac{r}{2})](2l_{LongFrame} + \tau)} dr.$$

$$P_{wss} = 2p'(1-p')e^{-p' \lambda \pi} \int_0^1 e^{-p' \lambda \pi [1 - 2q(\frac{r}{2})](2l_{ShortFrame} + \tau)} dr.$$

$$P_{ww} = (1-p')e^{-p' \lambda \pi}$$

P_{ww} 은 노드가 계속해서 wait 상태에 머물러 있을 확률이다. 즉, 전송을 위한 어떤 동작도 하지 않고 이웃 노드들 역

시 전송을 시도하지 않는다는 것을 의미한다. 그림 5의 succeed long, succeed short, fail long, fail short, wait의 steady-state 확률을 각각 π_{sl} , π_{ss} , π_{fl} , π_{fs} , π_w 라고 표기하고

$$\pi_w P_{ww} + \pi_{sl} + \pi_{ss} + \pi_{fl} + \pi_{fs} = \frac{1}{2 - P_{ww}} = \frac{1}{2 - (1-p')e^{-p' \lambda \pi}}$$

와 같이 π_{sl} 와 π_{ss} 를 구할 수 있다. succeed long 상태에서의 steady-state 확률 π_{sl} 은

$$\pi_{sl} = \pi_w P_{wsl} = \frac{P_{wsl}}{2 - (1-p')e^{-p' \lambda \pi}} = P_{sl}^u P_s \text{ 이고, succeed short}$$

에서의 steady-state 확률 π_{ss} 도 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\pi_{ss} = \pi_w P_{wss} = \frac{P_{wss}}{2 - (1-p')e^{-p' \lambda \pi}} = P_{ss}^u P_s$$

이제 우리는 앞에서 다루었던 분석적 수식으로 채널의 성능을 평가할 수 있는 수치인 throughput를 구할 수 있다. throughput Th 는

$$Th = \frac{\pi_{sl} l_{LongFrame} + \pi_{ss} l_{ShortFrame}}{\pi_w T_w + \pi_{sl} T_{sl} + \pi_{ss} T_{ss} + \pi_{fl} T_{fl} + \pi_{fs} T_{fs}}$$

$$= \frac{(\pi_{sl} l_{LongFrame} + \pi_{ss} l_{ShortFrame}) [\pi_w \tau + (l_{LongFrame} + \tau + l_{ack}) \pi_{sl} + (l_{ShortFrame} + \tau + l_{ack}) \pi_{ss} + (l_{LongFrame} + \tau) \pi_{fl} + (l_{ShortFrame} + \tau) \pi_{fs}]}{[\pi_w \tau + (l_{LongFrame} + \tau + l_{ack}) \pi_{sl} + (l_{ShortFrame} + \tau + l_{ack}) \pi_{ss} + (l_{LongFrame} + \tau) \pi_{fl} + (l_{ShortFrame} + \tau) \pi_{fs}]^2}$$

다음과 같이 throughput 계산식을 유도할 수 있다.

3. 결론

이 논문에서는 IEEE 802.15.4의 MAC 프로토콜의 saturation throughput를 구하기 위한 간단한 수학적 모델을 제시하였다. 하지만 제시된 수식이 정확한지에 대한 시뮬레이션 결과가 첨부되지 못한 점이 아쉽다. 시뮬레이션을 통한 수식의 검증은 차후에 작업으로 남겨두기로 한다. 시뮬레이션은 ns2 네트워크 시뮬레이터로 현재 진행 중이다.

참고 문헌

- [1] Yu Wang, J.J. Garcia-Luna-Aceves "Performance of Collision Avoidance Protocols in Single-Channel Ad Hoc Networks", ICNP'02, 2002.
- [2] IEEE P802.15.4 Standard, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-SPANs)
- [3] H. Takagi and L. Kleinrock, "Optimal Transmission Range for Randomly Distributed Packet Radio Terminals", IEEE Transactions on Communications, vol. 32, no.3, pp. 246-57, 1984.