

LBT-Random Searching 방식을 채용한 RFID 시스템의 트래픽 처리 시간 및 용량 해석

정회원 황인관*, 학생회원 임연준*, 정회원 표철식**

Processing Time and Traffic Capacity Analysis for RFID System Using LBT-Random Searching Scheme

In Kwan Hwang*, Yeon Jun Lim*, Cheol Sig Pyo** *Reguler Member*

요약

본 논문에서는 LBT-Random Searching 방식을 채용한 RFID 시스템의 트래픽 처리시간 및 주파수 채널 용량 분석을 위한 알고리즘을 제시하였다. 서비스 시간, 주파수 채널 탐색시간, 연속적인 주파수 채널 사용에 따른 지연시간, 연속적인 동일 주파수 채널 사용에 따른 지연시간을 고려하여 정상상태에서의 트래픽 처리 지연시간을 산출하였다. 시뮬레이션을 통하여 최대처리 가능한 트래픽 용량 및 주파수 채널수를 평가하고, 제안된 분석 알고리즘 정확성을 입증하였다.

Key Words : Ubiquitous Sensor Network, RFID, LBT.

ABSTRACT

In this paper, a processing time and traffic capacity analysis algorithm for RFID system using LBT-Random Searching scheme is proposed. Service time, carrier sensing time, additional delay time required for contiguous frequency channel occupancy, and additional delay time required for the contiguous using the same frequency channel are considered and the processing delay and frequency channel capacity are analyzed for the steady state operation of the system. The simulation results showing maximum capacity of the system and explaining the accuracy of the algorithm are provided.

I. 서론

신성장 동력사업의 일환으로서 RFID를 기반으로 하는 Ubiquitous Sensor Network이 활발하게 연구되고 있다. 국가적으로는, 향후 사용 가능한 제공 서비스, 트래픽 모델, 전송방식 등에 따른 다양한 시스템 파라미터, 공유 주파수 대역에서의 이중 시스템 간섭 등에 대한 종합적인 분석을 비롯하여, 현재 주파수 소요 대역폭뿐만 아니라 향후 주파수

소요 대역폭에 대한 명확한 분석을 기반으로 하는 주파수 계획이 요구되고 있다.

이를 위해서는 전송방식 등 다양한 시스템 파라미터들을 사전에 정의하여, 충돌 확률(collision probability) 및 트래픽 처리시간(processing time) 등을 분석하여 소요 주파수 대역을 정확히 예측하여야 할 수 있어야 한다.

본 연구의 내용과 관련하여 미국의 경우에는 FHSS 방식의 용량분석을 위한 연구결과가 Auto-ID

* 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 이동·위성통신연구실(ikhwang@chungbuk.ac.kr), ** 한국전자통신연구원

논문번호 : KICS2005-07-269, 접수일자 : 2005년 7월 5일

※ 본 연구는 한국전자통신연구원의 연구지원 및 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

센터의 기술문서^[1]에 제시되어 있다. 이 문서에서는 랜덤 FHSS의 트래픽 용량, 리더 개수, 채널 개수, 등에 따른 충돌확률(collision probability), 블록킹 확률을 분석하고 있으나, 주어진 시스템 전체 채널을 마치 k개의 리더가 arrival traffic에 따라 아무런 제약 없이 채널을 할당받아 사용하는 것을 가정하여 분석하고 있다. 유럽의 경우에는 공유주파수 대역에서 이중 시스템간의 간섭을 확률적으로 분석하고 이에 대한 보호거리 (protection distance), 처리 효율, 등을 분석 결과를 ETSI의 회의문서^[2]에 제시하고 있다.

본 연구에서는 유럽의 LBT(Listen Before-Talk) 방식에 따른 RFID 시스템의 트래픽 용량 분석을 위한 트래픽 처리시간 분석 알고리즘을 연구하고, 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 정확성을 입증하였다.

II. 본 론

2.1 LBT 방식의 운용 방식

LBT방식은 리더가 주파수 점유 상태를 확인(carrier sensing)하고 난 후 그 주파수의 사용여부를 결정하는 방식으로서 다음과 같은 운용 예를 전제로 일반적인 운용 파라미터에 대한 분석알고리즘을 개발한다.

- 한 개의 리더에 대한 주파수 점유시간은 4 sec 이내이고, 한번 주파수를 사용하고 난 후에는 100 ms를 쉰다.
- 리더가 채널을 사용하기 위하여 어떤 채널의 주파수 점유를 확인한 결과, 다른 리더가 점유하고 있어서 다른 주파수로 이동하는 경우에는 1 ms를 쉰다.
- 한 리더가 f_i 채널을 사용한 후, 다시 동일한 f_i 주파수를 사용하고자 할 경우에는 10 ms를 쉰다.

상기의 운용방식을 고려하여 시스템의 효율을 평가함에 있어서, 주파수탐색 후에는 arrival traffic에 대한 처리가 모두 이루어지기 때문에 처리효율(throughput)의 분석보다는 주파수탐색에 소요되는 지연시간에 대한 분석이 설계의 평가지표가 될 수 있을 것이다.

2.2 트래픽 처리시간의 분석

트래픽 처리시간 요인으로는 서비스시간(service time), 주파수 탐색시간(carrier sensing time) 및 연

속적으로 채널을 사용함에 따른 100 ms의 지연 (이하 t_{lad}) 또는 동일한 주파수 사용 시 요구되는 10 ms (이하 t_{fad})의 추가 지연요인을 들 수 있게 된다. 그리하여 처리시간 t 는 수식 (1)과 같이 서비스시간 t_s , 주파수탐색시간 t_{cs} , 추가지연 시간 t_{fad} 및 t_{lad} 합으로 구성되며, 이들은 상호 독립적인 관계를 갖는다.

$$t = t_{cs} + t_s + t_{lad} + t_{fad} \quad (1)$$

또한 이들 지연요인에 따른 트래픽 처리시간을 분석하기 위해서는 각 리더에 대하여 λT 의 평균 트래픽 발생확률, 그리고 무한대 크기의 큐(queue)를 갖는 M/G/1 모델을 가정한다.

트래픽의 서비스시간은 음성이나 데이터의 속성과는 다르게, 서비스 시간이 입력되는 RFID의 개수에 좌우되기 때문에 가우시안 분포를 가정함이 보다 일반적인 모델이 될 것이며, 시뮬레이션은 가우시안 분포에 대해서만 국한한다.

한 개의 리더가 주파수를 탐색하는 동안 활성리더의 개수, 즉 사용 중인 채널수는 변화하지 않는 것으로 가정한다. 이는 일반적으로 4 sec의 평균 점유시간과 4~10 MHz의 대역폭 내에 수용 가능한 채널 개수를 고려할 때, 주파수탐색에 소요되는 평균 시간이 평균 주파수채널 점유시간 보다 훨씬 작기 때문이다.

또한 주파수 탐색시간 t_{cs} 을 분석하기 위해서는 n 개의 활성리더(active reader)와 주파수 채널 수 C 를 가정하고, 편의상 평균 서비스 시간은 t_{sm} 로 표기한다.

랜덤하게 주파수를 탐색하는 경우에 있어서, 처음에 주파수 탐색에 성공할 확률은 $(C-n)/C$ 로써 매우 작은 시간이 소요되며, l 번째 주파수 탐색에 성공할 확률은 $(l-1)$ 번째까지 실패하고 그 다음 순서인 l 번째에서 성공하기 때문에 $\left(\frac{n}{C}\right)^{l-1} \left(1 - \frac{n}{C}\right)$ 로 표현될 수 있으며 $(l-1)$ ms가 소요된다. 그리하여 수식 (2)와 같은 확률 밀도함수를 구하여 계산을 체계화할 수 있게 된다.

$$f(t_{cs}) = \sum_{l=1}^{\infty} \left(1 - \frac{n}{C}\right) \left(\frac{n}{C}\right)^{l-1} \delta(t_{cs} - 10^{-3}l) \quad (2)$$

추가 지연시간 t_{lad} 및 t_{fad} 은 다음과 같은 운용상의 지연시간을 해석하기 위한 것으로서 즉, 일정한 시간 즉 주파수 탐색시간 t_{cs} 및 서비스시간 t_s 동안에 트래픽이 전혀 발생되지 않는 경우에는 추가지연이 발생하지 아니하고 트래픽이 1개 이상 발생되

는 경우에만 100 ms의 추가 시간 지연 t_{fad} 이 발생하게 된다. 따라서 추가 지연 시간 확률밀도 함수는 처리 지연 시간 t 를 정상상태에 대하여 1개의 트래픽이 처리되는 시간을 분석하기 때문에 수식 (3)와 같이 표현된다. 그리고 수식 (3)는 $t_a = t_s + t_{cs}$ 라고 정의하면 수식 (4)와 같이 정리된다.

$$f(t_{fad}/t_s, t_{cs}) = e^{-\lambda(t_s+t_{cs})} \delta(t_{fad}) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{[\lambda(t_{cs}+t_s)]^k e^{-\lambda(t_{cs}+t_s)}}{k!} \delta(t_{fad}-0.1) \quad (3)$$

$$f(t_{fad}/t_a) = e^{-\lambda t_a} \delta(t_{fad}) + \{1 - e^{-\lambda t_a}\} \delta(t_{fad}-0.1) \quad (4)$$

t_{fad} 에 대한 분석은 다소 복잡하다. 이는 일차적으로 분석 대상의 리더에서 일정한 시간 $t_{cs} + t_s$ 동안에 1개 이상의 추가 트래픽이 발생, 처리되는 동안 여타의 $(N-n)$ 개 비활성 리더들에 의해서는 추가 지연 시간 $t_{fad} + t_{jad}$ 동안 트래픽이 전혀 발생되지 않던가, 아니면 1개 이상의 트래픽이 발생되고 분석 대상의 리더가 현재 사용 중인 주파수를 사용하지 않는 경우가 된다. 10 ms의 지연시간이 발생에 대한 확률밀도함수는 수식 (5)과 같이 되고, 이를 정리하면 수식 (6)과 같이 표현되게 된다.

단 이때 여타 $(N-n)$ 개 리더에서 1개 이상의 트래픽이 발생되고, 분석 대상의 리더에서 계속 트래픽이 발생되며, 분석 대상의 리더가 계속 사용하고자 하는 주파수를 타 리더들이 먼저 사용하게 되는 경우에는 새로운 주파수 탐색 요인이 발생하게 된다. 하지만 이는 확률적으로 매우 작은 것으로 보고 무시한다.

$$f(t_{fad}/t_s, t_{cs}) = e^{-\lambda(t_s+t_{cs})} \delta(t_{fad}) + \left[\sum_{k=1}^{\infty} \frac{[\lambda(t_{cs}+t_s)]^k e^{-\lambda(t_{cs}+t_s)}}{k!} \right] \times A(n) \delta(t_{fad}-0.01) \quad (5)$$

$$f(t_{fad}/t_a) = e^{-\lambda t_a} \delta(t_{fad}) + \{1 - e^{-\lambda t_a}\} A(n) \delta(t_{fad}-0.01) \quad (6)$$

이 때 $A(n)$, P_{r1} , P_{r0} 는 다음과 같이 정의한다.

1) $N \leq C$ 의 경우

$$A(n) = e^{-(N-n)\lambda(t_{fad}+t_{jad}-10^{-3})} + \sum_{k=1}^{N-n} \binom{N-n}{k} P_{r1}(k) P_{r0}(k) \quad (7)$$

$$P_{r1}(k) = [1 - e^{-\lambda(t_{fad}+t_{jad}-10^{-3})}]^k \times \prod_{l=0}^{k-1} \frac{C-n-l}{C-n-l+1} \quad (8)$$

$$P_{r0}(k) = [e^{-\lambda(t_{fad}+t_{jad}-10^{-3})}]^{N-n-k} \quad (9)$$

2) $N > C$ 의 경우

$$A(n) = e^{-(N-n)\lambda(t_{fad}+t_{jad}-10^{-3})} + \sum_{k=1}^{C-n-1} \binom{N-n}{k} P_{r1}(k) P_{r0}(k) + \sum_{k=C-n}^{N-n} \frac{(N-n)!}{(C-n)!(k-C+n)!(N-n-k)!} \times P'_{r1}(k) P'_{r2}(k) P'_{r0}(k) \quad (10)$$

$$P'_{r1}(k) = \left[\frac{(C-n)}{k} (1 - e^{-\lambda(t_{fad}+t_{jad}-10^{-3})}) \right]^{C-n} \times \prod_{l=0}^{C-n-1} \frac{C-n-l}{C-n-l+1} \quad (11)$$

$$P'_{r2}(k) = \left(1 - \frac{(C-n)}{k} \right)^{k-C+n} \times (1 - e^{-\lambda(t_{fad}+t_{jad}-10^{-3})})^{k-C+n} \quad (11)$$

$$P'_{r0}(k) = [e^{-\lambda(t_{fad}+t_{jad}-10^{-3})}]^{N-n-k} \quad (13)$$

2.3 정상상태 트래픽 처리시간 분석

정상상태에서 m 개의 트래픽이 저장되어 있고 이 중 한 개의 트래픽이 처리되고 있으며, 이 트래픽은 t 시간 후에 처리가 완료된다. 그리고 t 시간 동안 k 개의 트래픽이 발생되어 버퍼에 입력된다. 이때 t 시간 후 버퍼에 머물러 있는 트래픽의 개수를 m' 라고 한다면, 정상상태에서는 다음과 같은 관계식을 갖게 된다.

$$m' = \max(m-1, 0) + k = m-1 + \delta_m + k \quad (14)$$

단, $\delta_m = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 0, & m>0 \end{cases}$

좌·우변에서의 기대값을 계산하면 다음과 같이 표현된다.

$$E\{m'\} = E\{m\} + E\{\delta_m\} + E\{k\} - 1 \quad (15)$$

또한 t 시간 동안 발생하는 평균 트래픽 개수는 수식 (16)과 같이 표현된다.

$$E\{k/t\} = \sum_{k=0}^{\infty} k \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} = \lambda t \quad (16)$$

그리고 $E\{k\}$ 는 트래픽 처리시간에 대한 확률밀도 함수로써 다음과 같이 구할 수가 있게 된다.

$$E\{k\} = \int_0^{\infty} E\{k/t\}f(t)dt = \lambda \int_0^{\infty} tf(t)dt \quad (17)$$

상기의 식에서 적분항의 값은 일반적인 모든 분포에 대하여 평균 트래픽 처리시간이라고 할 수 있으나, $t = t_{cs} + t_s + t_{iad} + t_{jad}$ 이기 때문에 조심스런 접근이 요구된다.

상기의 기대값을 계산하기 위한 확률 밀도함수 $f_{t_{cs}}(t_{cs})$ 와 $f_{t_s}(t_s)$ 는 랜덤변수 t_{cs} 와 t_s 가 상호 독립적인 관계에 있기 때문에 컨벌루션 관계를 갖는다.

$$f_{t_a}(t_a) = f_{t_{cs}}(t_a) * f_{t_s}(t_a) \quad (18)$$

따라서 앞에서 구한 수식 (2)의 $f_{t_{cs}}(t_{cs})$ 는 다음과 같은 일반적인 형태로 표현할 경우

$$f_{t_{cs}}(t_{cs}) = \sum_{l=0}^{\infty} a_l \delta(t_{cs} - 10^{-3}l) \quad (19)$$

또한, 수식 (18)는 다음과 같이 정리된다.

$$f_{t_a}(t_a) = \sum_{l=0}^{\infty} a_l f_{t_s}(t_a - 10^{-3}l) \quad (20)$$

2.4 트래픽 길이가 Gaussian 분포를 갖는 경우의 트래픽 처리시간 분석

위에서 구한 수식 (4), (5) 및 (6)을 이용하여 t_a 및 추가지연 시간에 대한 기대값을 가우시안 분포의 $f_{t_s}(t_s)$ 에 대하여 구하면 수식 (21), (22) 및 (23)과 같이 간단히 표현된다.

$$\begin{aligned} E\{t_{jad}\} &= \int_0^{\infty} t_{jad} f(t_{jad}) dt_{jad} \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} t_{jad} f(t_{jad}/t_a) f(t_a) dt_{jad} dt_a \\ &= \int_0^{\infty} 10^{-2} A(n) \{1 - e^{-\lambda t_a}\} \sum_{l=0}^{\infty} a_l f_{t_s}(t_a - 10^{-3}l) dt_a \\ &= 10^{-2} A(n) \left[1 - e^{-\frac{\lambda}{2}(2t_{sm} - \lambda \sigma^2)} \sum_{l=0}^{\infty} a_l e^{-\lambda 10^{-3}l} \right] \\ &= 10^{-2} A(n) \left[1 - \frac{(C-n)}{(C - ne^{-10^{-3}\lambda})} e^{-\frac{\lambda}{2}(2t_{sm} - \lambda \sigma^2)} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} E\{t_{iad}\} &= \int_0^{\infty} t_{iad} f(t_{iad}) dt_{iad} \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} t_{iad} f(t_{iad}/t_a) f(t_a) dt_{iad} dt_a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \int_0^{\infty} 10^{-1} (1 - e^{-\lambda t_a}) f(t_a) dt_a \\ &= \int_0^{\infty} 10^{-1} (1 - e^{-\lambda t_a}) \sum_{l=0}^{\infty} a_l f_{t_s}(t_a - 10^{-3}l) dt_a \\ &= 10^{-1} \left[1 - \sum_{l=0}^{\infty} a_l e^{-\frac{\lambda}{2}(2(t_{sm} + 10^{-3}l) - \lambda \sigma^2)} \right] \\ &= 10^{-1} \left[1 - \frac{(C-n)}{(C - ne^{-10^{-3}\lambda})} e^{-\frac{\lambda}{2}(2t_{sm} - \lambda \sigma^2)} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} E\{t_s + t_{cs}\} &= E\{t_a\} = \int_0^{\infty} t f(t_a) dt_a \\ &= \int_0^{\infty} t_a \sum_{l=0}^{\infty} a_l f_{t_s}(t_a - 10^{-3}l) dt_a \\ &= \sum_{l=0}^{\infty} a_l (t_{sm} + 10^{-3}l) = t_{sm} + \frac{10^{-3}n}{C-n} \end{aligned} \quad (23)$$

따라서 이들 결과 식 즉 수식 (21), (22), 및 (23)의 결과를 합산하면 수식 (24)을 도출할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} E\{t\} &= \sum_{l=0}^{\infty} a_l (t_{sm} + 10^{-3}l) + 0.1(1 + 0.1A(n)) \\ &\times \left[1 - \sum_{l=0}^{\infty} a_l e^{-\frac{\lambda}{2}(2(t_{sm} + 10^{-3}l) - \lambda \sigma^2)} \right] \end{aligned} \quad (24)$$

또한 정상상태에서는 $E\{m'\} = E\{m\}$ 이기 때문에 수식 (15)은 수식 (17) 및 (24)의 결과 식을 이용하면 수식 (25)와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} E\{\delta_m\} = 1 - Bk &= 1 - \lambda \sum_{l=0}^{\infty} \{a_l (t_{sm} + 10^{-3}l) \\ &- 0.1\lambda(1 + 0.1A(n))\} \times \left[1 - \sum_{l=0}^{\infty} a_l e^{-\frac{\lambda}{2}(2(t_{sm} + 10^{-3}l) - \lambda \sigma^2)} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

그리고 수식 (14)의 양변을 제곱하면 수식 (26)과 같이 표현된다.

$$m'^2 = m^2 + \delta_m^2 + (k-1)^2 + 2m\delta_m + 2(k-1)\delta_m + 2(k-1)m \quad (26)$$

또한 정상상태에서는 아래의 관계가 성립된다.

$$E\{m'^2\} = E\{m^2\} \quad (27)$$

$$\delta_m^2 = \delta_m \quad (28)$$

$$m\delta_m = 0 \quad (29)$$

따라서, 수식 (26)은 수식 (30)와 같이 정리되며, 이에 대한 기대값을 구하면 수식 (31)와 같이 정리된다.

$$0 = \delta_m + (k-1)^2 + 2m\delta_m + 2(k-1)\delta_m + 2m(k-1) \quad (30)$$

$$0 = E\{\delta_m\} + E\{(k-1)^2\} + 2E\{(k-1)\delta_m\} + 2E\{m(k-1)\} \quad (31)$$

이 때 트래픽은 Poisson 분포로 발생되고 이는 m 과 δ_m 이 독립적인 관계에 있기 때문에 다음의 관계식이 성립된다.

$$E\{m(k-1)\} = E\{m\}E\{k-1\} \quad (32)$$

$$E\{(k-1)\delta_m\} = E\{k-1\}E\{\delta_m\} \quad (33)$$

그리하여 수식 (31)는 수식 (34) 및 (35)로 정리된다.

$$\begin{aligned} 0 &= E\{\delta_m\} + E\{k^2 - 2k + 1\} \\ &\quad + 2E\{k-1\}E\{\delta_m\} + E\{m\}E\{k-1\} \\ &= (1 - E\{K\})(3 - 2(1 - E\{k\}) - 1) \\ &\quad - 2E\{m\}(1 - E\{k\}) + E\{k^2\} \end{aligned} \quad (34)$$

$$E\{m\} = E\{k\} + \frac{E\{k^2\} - E\{k\}}{2(1 - E\{k\})} \quad (35)$$

다시 정리하기 위해서는 $E\{k^2\}$ 을 구하여야 한다.

$$E\{k^2\} = \int_0^\infty E\{k^2/t\}f(t)dt \quad (36)$$

$$E\{k^2/t\} = \sum_{k=0}^\infty k^2 \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} = (\lambda t)^2 + \lambda t \quad (37)$$

$$E\{k^2\} = \int_0^\infty \{(\lambda t)^2 + \lambda t\}f(t)dt \quad (38)$$

이 때 처리시간 t 는 서비스시간 t_s , 주파수 채널 탐색시간 t_{cs} , 추가지연 시간 t_{jad} 및 t_{iad} 합으로 구성되며, 이들은 상호 독립적인 관계를 갖는다. 따라서 아래의 관계식이 성립하게 되며

$$\begin{aligned} E\{t^2\} &= E\{(t_{jad} + t_{iad} + t_a)^2\} = E\{t_{jad}^2\} + E\{t_{iad}^2\} + E\{t_a^2\} \\ &\quad + 2E\{t_{jad}\}E\{t_{iad}\} + 2E\{t_{iad}\}E\{t_a\} + 2E\{t_a\}E\{t_{jad}\} \end{aligned} \quad (39)$$

$E\{t_{jad}^2\}$, $E\{t_{iad}^2\}$, 및 $E\{t_a^2\}$ 는 각각 수식 (40),

(41), 및 (42)과 같이, 그리고 $E\{t^2\}$ 은 수식 (43)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} E\{t_{jad}^2\} &= \int_0^\infty E\{t_{jad}^2/t_a\}f(t_a)dt_a \\ &= \int_0^\infty 10^{-4}A(n) \sum_{k=1}^\infty \frac{(\lambda t_a)^k}{k!} e^{-\lambda t_a} f(t_a) dt_a \\ &= \int_0^\infty 10^{-4}A(n) \{1 - e^{-\lambda t_a}\} \\ &\quad \sum_{l=0}^\infty a_l f_{t_s}(t_a - 10^{-3}l) dt_a \end{aligned} \quad (40)$$

$$= 10^{-4}A(n) \left[1 - \sum_{l=0}^\infty a_l e^{-\frac{\lambda}{2}\{2(t_{sm} + 10^{-3}l) - \lambda\sigma^2\}} \right]$$

$$\begin{aligned} E\{t_{iad}^2\} &= \int_0^\infty \int_0^\infty t_{iad}^2 f(t_{iad}/t_a) f(t_a) dt_{iad} dt_a \\ &= \int_0^\infty 10^{-2}(1 - e^{-\lambda t_a}) f(t_a) dt_a \\ &= 10^{-2} \int_0^\infty (1 - e^{-\lambda t_a}) \sum_{l=0}^\infty a_l f_{t_s}(t_a - 10^{-3}l) dt_a \\ &= 10^{-2} \left[1 - \sum_{l=0}^\infty a_l e^{-\frac{\lambda}{2}\{2(t_{sm} + 10^{-3}l) - \lambda\sigma^2\}} \right] \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} E\{t_a^2\} &= \int_0^\infty t_a^2 f(t_a) dt_a \\ &= \int_0^\infty t_a^2 \sum_{l=0}^\infty a_l f_{t_s}(t_a - 10^{-3}l) dt_a \\ &= \sum_{l=0}^\infty a_l \{\sigma^2 + (t_{sm} + 10^{-3}l)^2\} \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} E\{t^2\} &= 10^{-2}(10^{-2}A(n)+1) \\ &\quad \times \left[1 - \sum_{l=0}^\infty a_l e^{-\frac{\lambda}{2}\{2(t_{sm} + 10^{-3}l) - \lambda\sigma^2\}} \right] \end{aligned} \quad (43)$$

$$+ \sum_{l=0}^\infty a_l \{\sigma^2 + (t_{sm} + 10^{-3}l)^2\} + Q(n)$$

단, $Q(n)$ 은 수식 (50)와 같이 정의한다. 수식 (38)의 결과를 이용하여 수식 (35)을 간략히 하면 수식 (44)로 표현된다.

$$E\{m\} = E\{k\} + \frac{\lambda^2 E\{t^2\}}{2(1 - E\{k\})} \quad (44)$$

수식 (44)를 계산하기 위하여 수식 (24)의 $E\{k\}$ 를 랜덤 주파수 탐색방식, 즉 수식 (2)에 대하여 계산하면 수식 (45) 및 (46)로 정리된다. 그리고 이 결과를 비롯하여, 수식 (21), (22), 및 (23)의 결과를 수식 (44)에 대입하면 수식 (47)의 결과를 얻을 수가 있게 된다.

$$E\{k\} = \lambda \left(t_{sm} + \frac{10^{-3}n}{C-n} \right) + 0.1\lambda(1+0.1A(n))B(n) \quad \lambda P_{n-\bar{r}} = n! P_n \quad (45) \quad (51)$$

$$B(n) = 1 - \sum_{l=0}^{\infty} a_l e^{-\frac{\lambda}{2} \{2(t_{sm} + 10^{-3}l) - \lambda \sigma^2\}} \quad P_n = \frac{\lambda}{n!} P_{n-\bar{r}} \frac{a}{n} P_{n-\bar{r}} \frac{a^n}{n!} P_0 \quad (46) \quad (52)$$

$$= 1 - e^{-\frac{\lambda}{2} \{2(t_{sm} - \lambda \sigma^2)\}} \frac{C-n}{C-n e^{-10^{-3}\lambda}} \quad \sum_{n=0}^C P_n = 1 \sum_{n=0}^C \frac{a^n}{n!} P_0 \quad (47) \quad (53)$$

$$E\{m\} = \lambda \left(t_{sm} + \frac{10^{-3}n}{C-n} \right) + 0.1\lambda(1+0.1A(n)) \quad P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^C \frac{a^n}{n!}} \quad (48) \quad (54)$$

$$B(n) + \frac{V_1(n)}{V_2(n)} \quad P_n = \frac{\frac{a^n}{n!}}{\sum_{n=0}^C \frac{a^n}{n!}} \quad (49) \quad (55)$$

이 때 $V_1(n)$ 은 수식 (48), $V_2(n)$ 은 수식 (49)와 같이 정의되고, $Q(n)$ 은 수식 (50)로 정의된다. 수식 (47)은 활성리더의 개수 n 의 함수이기 때문에 활성리더 개수 n 에 대한 확률을 계산하여 최종적인 평균 트래픽 개수 산출하게 된다.

$$P_0 = \frac{1}{1+a} \quad (56)$$

$$P_1 = \frac{a}{1+a} \quad (57)$$

$$V_1(n) = \lambda^2 10^{-2} (10^{-2}A(n) + 1)B(n) + \lambda^2 Q(n) + \lambda^2 \left\{ \sigma^2 + t_{sm}^2 + 2t_{sm} \frac{10^{-3}n}{C-n} + \frac{10^{-6}n(C+n)}{(C-n)^2} \right\} \quad (48)$$

$$V_2(n) = 2[1 - E\{k\}] \quad (49)$$

$$Q(n) = 2E\{t_{fad}\}E\{t_{iad}\} + 2E\{t_{iad}\}E\{t_a\} + 2E\{t_a\}E\{t_{fad}\} \quad (50)$$

2.5 활성리더의 발생확률 및 평균 트래픽 처리 시간

λ 를 초당 트래픽 발생률, $1/\mu$ 를 서비스 시간, $a = \lambda/\mu$ 를 트래픽 밀도(traffic intensity), N 를 총 리더의 개수, C 를 주파수 채널수라 정의하고, P_n 를 각 리더에서 n 개 주파수 채널을 점유할 확률로 정의하면, 정상상태에서는 수식 (51)의 관계식을 갖게 된다. 그리고 P_n 를 P_0 에 함수형태로 정리하면 수식 (52)의 관계식을 얻게 되며, 모든 P_n 의 합이 1이기 때문에 P_0 는 수식 (54)로 그리고 P_n 는 수식 (55)로 일반화시킬 수 있게 된다.

이 때, 각 리더에서 점유 가능한 주파수 채널의 개수는 최대 1개이기 때문에 이항분포(binomial distribution)를 갖게 된다. 그리하여 주파수채널을 점유하지 않을 확률 P_0 , 1개 주파수 채널을 점유할 확률 P_1 은 수식 (56) 및 (57)과 같이 표현된다.

총 주파수 채널의 개수가 C 이기 때문에 활성리더의 최대 개수는 C 개 또는 $N \leq C$ 인 경우에는 N 개가 된다. 이 때 평균 처리시간은 활성리더의 개수가 $(C-1)$ 까지의 경우만 계산한다.

따라서 $N \leq C$ 의 경우에는 수식 (58)와 같이 평균을 구한다. $N > C$ 의 경우, n 이 $(C-1)$ 이 되는 확률은 k 개의 리더 중에서 $(C-1)$ 개 망이 활성리더가 될 수 있기 때문에 k 의 범위가 $\{(C-1) \leq k \leq N\}$ 인 영역에서 수식 (60)과 같이 산출된다. 또 활성리더의 개수가 $(C-1)$ 개까지 될 모든 확률과 전체 버퍼에 도착하여 처리되는 평균 트래픽의 개수는 수식(61)로 정규화하여 수식(59)과 같이 구해지게 된다.

1) $N \leq C$ 의 경우

$$E_n\{E\{m(n)\}\} = \sum_{n=0}^{C-1} E\{m(n)\} \times \binom{N}{n} \left(\frac{a}{1+a} \right)^n \left(1 - \frac{a}{1+a} \right)^{N-n} \quad (58)$$

2) $N > C$ 의 경우

$$E_n\{E\{m(n)\}\} = \frac{1}{T(n)} \left[\sum_{n=0}^{C-2} E\{m(n)\} \binom{N}{n} \left(\frac{a}{1+a} \right)^n \left(1 - \frac{a}{1+a} \right)^{N-n} + \{E\{m(C-1)\}\} S(N,C) \right] \quad (59)$$

$$S(N, C) = \sum_{k=C}^N \frac{N!}{(C-1)!(k-C+1)(N-k)!} \times \left[\left(\frac{a}{1+a} \right) \left(\frac{C-1}{k} \right) \right]^{C-1} \times \left[\left(\frac{a}{1+a} \right) \left(1 - \frac{C-1}{k} \right) \right]^{k-C+1} \times \left[1 - \frac{a}{1+a} \right]^{N-k} \quad (60)$$

$$T(n) = \sum_{n=0}^{C-1} \binom{N}{n} \left(\frac{a}{1+a} \right)^n \left(1 - \frac{a}{1+a} \right)^{N-n} + S(N, C) \quad (61)$$

결국 Little's Theorem에 의하여 버퍼에 트래픽이 도착하여 서비스가 종료되기까지의 평균시간은 수식 (62)으로 정리된다.

$$T = \frac{1}{\lambda} E_n \{ E(m(n)) \} \quad (62)$$

III. 시뮬레이션 결과

개발된 트래픽 용량 분석 알고리즘에 대한 정확도를 평가하기 위하여 평균 서비스 시간을 4 sec로, 서비스 시간의 분산을 0.2 sec², 주파수 탐색시간을 1 msec로 가정하고, arrival traffic 밀도가 작은 경우, 즉 리더 당 0.5 interrogation/min, 그리고 최악의 경우로서 리더 당 8.5 interrogation/min을 가정하여 모의실험 결과를 제시하였다.

이때 6.86(sec) × 8.5(interrogation/min)은 58.3으로서 최대 60 sec × interrogation/min, 즉 1 Erlang 이내의 값을 갖아야 함을 의미한다.

Arrival traffic 밀도가 작은 그림 1에서는, 큐에 도착하여 서비스가 종료되기까지 기본적인 4 sec의 평균 서비스 시간의 0.7 sec 가량의 지연시간을 보이고 있다. 이는 주파수 채널 용량이 감소되거나 리더수가 증가될수록 지연시간은 증가하는 경향을 보이고 있다.

최악의 경우인 그림 2에서는, 큐에 도착하여 서비스가 종료되기까지 기본적으로 4 sec의 평균 서비스 시간외 2.8 sec 가량의 지연시간을 보이고 있다. 이는 이전의 경우와 다르게 주파수 채널 용량이 감소되거나 리더수가 증가될수록 지연시간이 증가하다가 포화되는 경향을 보이고 있다. 이러한 지연시간 포화는 주파수 채널에 의한 처리 가능 트래픽 용량 이상을 알고리즘에 포함시키지 않았기 때문이다. 즉 C개의 주파수 채널에서 처리 가능한 트래픽 용량은 C×4(sec)×15(interrogation/min)이 되며, 리더 당 4(sec)×8.5(interrogation/min)의 트래픽이 도착하는 경우, 수용 가능한 리더의 최대 개수는 4×15×C /

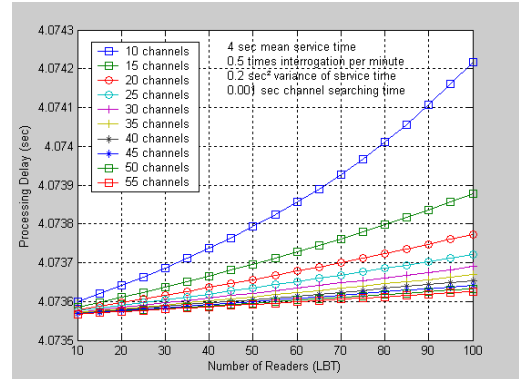


그림 1. 주파수 채널 용량 및 리더수에 따른 트래픽 처리시간

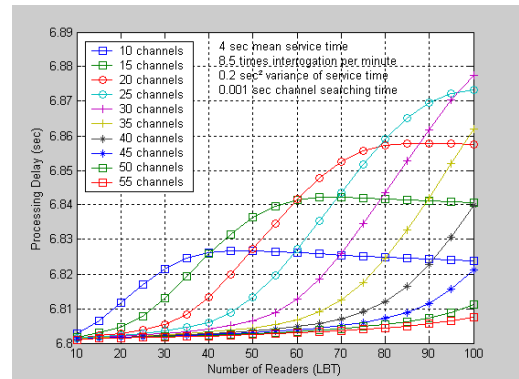


그림 2. 주파수 채널 용량별 최대 처리 트래픽 밀도 및 최대 수용 리더 수

(4×8.5)가 된다.

따라서 그림 2에서도 수용 가능한 리더 개수의 범위 이내에서는 그림 1에서와 동일하게 주파수 채널 용량이 감소될수록 그리고 리더 수가 증가될수록 지연시간이 단조 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수가 있게 된다.

IV. 결론

본 논문에서는 LBT random search 방식에 대한 분석 알고리즘을 분석하고, 이에 대한 정확도를 입증하기 위하여 시뮬레이션을 제시하였다.

평균 서비스 타임의 평균은 4 sec로 국한하고, 서비스 타임의 분산 값, 분당 트래픽 발생 비율 및 채널 탐색 시간을 변경하여 모의실험을 실시하였다. 그 결과, 분산의 값이 서비스 타임의 평균값보다 크게 작으면 단순히 리더의 개수가 증가함에 따라 평균 처리 시간이 증가하는 모습을 보였다.

Little's Theorem에 의해 제시된 바와 같이, 큐에 도착하여 서비스가 종료되기까지 기본적으로 4 sec

의 평균 서비스 시간외에 추가 지연시간이 소요되는 일반적인 경향과 주파수 채널 용량이 감소되거나 리더수가 증가될수록 지연시간이 단조 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수가 있었다.

본 논문에서는 시스템 설계에 필요한 실질적인 시스템 파라미터들이 포함된 주파수 채널 용량 및 수용 가능 리더 수에 대한 실질적인 분석은 연구 범위에 포함시키지 아니하였으나, 본 연구 결과를 이용하여 충분히 최적 설계가 가능함을 보이고 있다.

참고 문헌

- [1] Daniel W. Engels, "The Reader Collision Problems", White Paper Published by Auto-ID Center, Nov. 1, 2001.
- [2] Draft ECC Report on Strategic Plan 863-870 MHz, Aug. 1, 2003.
- [3] Papoulis, A. Probability, *Random Variables, and Stochastic Processes*, McGraw-Hill Book Company, 1965.
- [4] Tri T. Ha, *Digital Satellite Communication, 2nd edition*. McGraw-Hill Publishing Company, 1990.

황 인 관 (In-Kwan Hwang) 정회원



1979년 2월 아주대학교 전자 공학과 졸업
1990년 6월 Polytechnic University, E.E. Dep 박사
1997년 3월 한국전자통신연구원 위성망 연구실장 책임연구원
1997년 3월~현재 충북대학교 전

기전자컴퓨터공학부 부교수

<관심분야> 이동통신, WiBro, UWB, RFID, Cognitive Radio

임 연 준 (Yeon-Jun Lim)

학생회원



1999년 2월 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 입학
1999년 2월~현재 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 4년 재학
<관심분야> RFID, 디지털 신호처리, 디지털 통신

표 철 식 (Cheol-Sig Pyo)

정회원



1991년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1991년 1월~현재 한국전자통신연구원 텔레매틱스/USN 연구단 RFID/USN연구그룹, 책임

연구원

<관심분야> RFID/USN 기술, 안테나 및 무선 기술