The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63P, No. 3, pp. 195~199, 2014
http://dx.doi.org/10.5370/KIEEP.2014.63.3.195

M2M 어플리케이션 지원을 위한 무선 결합 전송 플랫폼의 전송률 분석

Throughput Analysis of Wireless Transmission Platform using Multiple Wireless Chips for M2M Networks

왕 한 호* · 우 중 재†
(Hanho Wang · Choongchae Woo)

Abstract - Various M2M applications have different quality-of-service(QoS) requirements to be implemented practically. QoS requirements are normally data rate and delay constraint. However, there are limited number of wireless communication chip solutions which cannot support QoS requirements for all M2M application. Hence, aggregated usage of plural wireless communication chip solutions should be needed to implement M2M applications. In this paper, we consider the case that two wireless communication chips using random access protocol work together to transmit data of an M2M application. In such case, data rate and delay performance are mathematically analyzed. In our results, practical data rate can be improved from 2.5 to 7 times while delay constraints are satisfied if we simply use two wireless communication chips together.

Key Words : M2M, Multi-wireless transmission

1. 서 론

기기간 무선 통신(Machine-to-Machine Communication, M2M)은 기존의 장치에 무선 통신을 부가하여 컴퓨터 네트워크로 제어하기 위한 기술 분야로써 다양한 기술분야에 적용될 수 있는 융합기술이다[1]. 사람들의 신체에 부착된 바이오 센서가 건강 이상 신호를 무선통신 기능을 이용하여 의료기관으로 전송하는 e-Health부터 각종 전기, 수도 사용량 검침을 위한 스마트 미터링(smart metering) 그리고 효율적인 전기 에너지 생산과 분배를 위한 스마트 그리드에 이르기까지 M2M 무선 통신은 다양한 분야에 적용될 수 있다[2,3]. 현재의 무선 통신 기술은 셀룰러 시스템을 중심으로 발전되어 있으며, 셀룰러 시스템에는 고속 이동 통신 환경을 구축하기 위한 복잡한 기술들이 집약적으로 구현하고 있으나, 다양한 M2M 어플리케이션이 요구하는 전송률과 전송 지연에 대한 요구를 만족시키는 것에 한계가 있다. 특히 저전력 전송이나 ISM(indystry-science-medical) 주파수 대역에서의 무선 통신 및 분산기반 다중 접속(distributed control multiple access)은 셀룰러 시스템이 제공하지 못하는 기능이다.

셀룰러 시스템을 제외하고 나면, ISM 밴드에서 통신할 수 있는 지그비(zigbee), 블루투스(bluetooth), 와이파이(WiFi)와 같은 무선 솔루션(범용 칩)이 있다. 이들 무선 솔루션은 셀룰러 시스템을 이용하기 위한 모뎀 대비 비교적 저전력이며 분산 기반 다중 접속을 지원하므로 별도의 인프라가 갖추어지지 않아도 M2M 어플리케이션에 적용할 수 있다. 다만, 이들 무선 솔루션들도 특정 범위의 전송률 제한을 받고 있으며, M2M 어플리케이션 별로 요구하는 전송 지연에 대한 조건을 만족시키는 수단을 제공하지 못하고 있다. 따라서 두 개 이상의 무선 솔루션을 결합하여 사용하기 위한 기술과 결합하여 제공되는 무선통신 플랫폼의 성능 분석이 요구된다.

저전력 무선 통신이 가능하도록 하는 지그비와 블루투스 범용 통신 칩의 경우 다중 접속 기술로 임의 접속(random access)를 사용하고 있다[4]. 임의 접속을 사용하는 경우 특정 시간 슬롯에 지정된 사용자에게 할당되는 것이 아니므로, 하나의 주파수를 공유하고 있는 사용자 수 및 프로토콜 파라미터 튜닝에 의하여 그 성능이 달라진다[5]. 특히 임의접속 프로토콜은 스케쥴링 알고리즘이 특장 장치에 의하여 제어되지 않으므로, 전송 속도와 전송 지연이 임의로 변화하게 되므로 M2M 어플리케이션이 요구하는 서비스의 질(quality-of-service, QoS)를 만족하지 못하게 될 수 있으므로 이론적으로 면밀한 시스템 성능 분석이 요구된다.

본 논문에서는 두 개의 임의 접속 기반 범용 통신 칩이 통합되어 데이터를 전송하기 위한 무선 통신 플랫폼의 성능을 이론적으로 분석한다. 지그비, 블루투스 및 와이파이에서 사용되는 임의 접속을 일반화하여 고려하며, 하나의 소스로부터 생성된 데이터가 두 개의 통신 칩에 의하여 나뉘어 전송된다. 이를 통하여 전송률 증대 효과 및 전송 지연이 어떻게 개선되는지 정량적으로 분석한다. 일반적인 임의 접속 프로토콜 전송률에 대한 분석에 대한 연구는 기존에 많이 이루어져 있으나[5-7], 복수의 무선 통신 칩에 의하여 결합

† 교신저자 : 한서대학교 전자공학과 조교수
E-mail : woo9@hanseo.ac.kr
* 정 회 원 : 상명대학교 정보통신공학과 조교수
접수일자 : 2014년 3월 27일
수정일자 : 2014년 5월 17일
최종완료 : 2014년 5월 19일

전송된 경우에 대하여 연구된 바 없다. 단순히 그 결과를 예상해 보면 두 개의 통신 칩을 사용하므로 두 배의 성능 개선 효과가 있을 것이라고 생각하기 쉬우나, 임의 접속 특성상 성능 개선의 정량적인 수치는 확률에 의하여 제공 될 수 밖에 없으며 M2M 어플리케이션과 연계하여 QoS를 만족할 확률로 분석되게 된다. 이러한 결과 제시를 통하여 무선 통신 칩의 다양한 결합 전송에 의한 성능 개선을 예상해 보기 위한 기본 틀을 제공하는 것이 본 논문의 최종 목표이다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델

본 논문에서 고려하고 있는 시스템 모델은 그림 1에 도시되어 있다. 하나의 소스에서 데이터가 생성된다. 여기서 소스는 특정 M2M 어플리케이션이다. M2M 어플케이션이 요구하는 QoS는 전송률과 전송 지연 발생 확률로 평가될 수 있다. 그림 1에 도시되어 있는 바와 같이 두 개의 범용 무선 통신 칩을 가정한다. 통신 칩은 기본적인 임의 접속 방식으로 슬롯화된 알로하(slotted ALOHA)를 사용한다고 가정한다. 두 개의 통신 칩이 동작하는 환경은 다를 수 있다. 환경이 다르다 함은 프로토콜 파라미터가 상이하거나 각 통신 칩이 사용하는 주파수 대역에 동시에 사용하는 사용자 수가 달라 전송 성공 확률이나 전송 시도의 빈도가 상이할 수 있음을 의미한다. 소스에서 생성된 데이터는 각 시스템에서 전송하기 위하여 같은 데이터 크기의 프레임으로 분할되며 마이크로 콘트롤러 유닛(micro-controller unit)에 의하여 제어되어 무선 통신 칩 W1과 W2에 전달되어 전송되게 된다.

정량적인 전송 성능을 평가하기 위하여 시간 단위는 무선 통신 칩의 슬롯 단위로 정규화되며, 전송에 사용된 전체 시간은 로 표기한다. 또한 통신 칩 W1과 W2 각각에서 시간 동안 전송된 데이터 프레임 수는 과 로 표시하며 랜덤 변수이다.

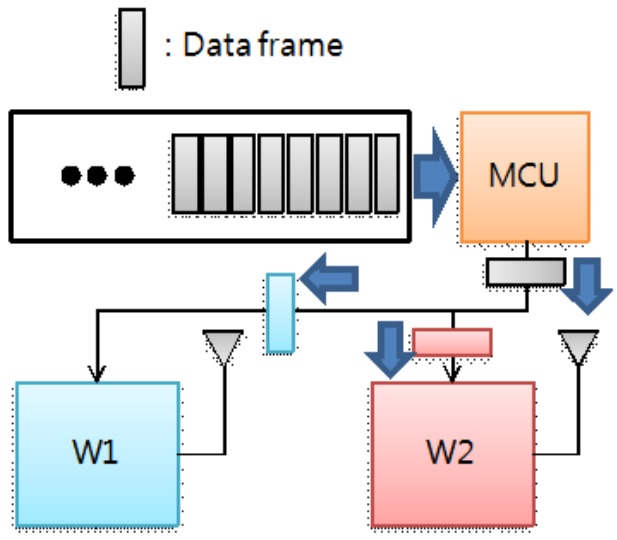

그림 1 시스템 모델
Fig. 1 System model

2.2 무선 결합 전송 성능 분석

임의 접속에 의한 다중 접속 프로토콜은 프로토콜 파라미터 값을 설정하는 것과 동일한 주파수 대역을 공유하고 있는 사용자 수에 따라서 전송 확률 가 결정된다[5]. 특정 주파수 대역에서 동일한 시스템을 사용하는 사용자가 이라고 할 때, 하나의 슬롯에서 데이터 프레임이 전송되고, 전송된 프레임이 성공적으로 수신될 확률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_S = \frac{p_T \cdot (1-p_T)^{N-1}}{1-(1-p_T)^N} \tag{1}$$

2.3 에너지 제한된 센싱 기법의 성능 평가

둘 이상의 사용자가 동시에 전송하여 전송 간 충돌(collision)이 발생하거나 어떤 사용자도 전송하지 않는 경우에 대하여 해당 슬롯은 데이터를 전송하지 못하고 소비된다. 이러한 경우 전송률이 낮아지게 되고 동시에 전송 지연이 발생하게 된다.

시간을 관찰하였을 때 W1에서 개의 데이터 프레임이 전송되었을 확률은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P(K, C_1) = \binom{K}{C_1} p_S^{C_1} (1-p_S)^{K-C_1} \tag{2}$$

W2에 대하여 동일한 시간 동안 관찰해 보면 수식(2)와 동일한 계산이 가능하여 수식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P(K, C_2) = \binom{K}{C_2} p_S^{C_2} (1-p_S)^{K-C_2} \tag{3}$$

각각의 무선 통신 칩에서 전송한 데이터 프레임 수가 중요한 것이 아니라, W1과 W2에서 전송한 데이터 프레임 수의 합이 중요하므로 과 를 합한 새로운 랜덤 변수 를 다음과 같이 새로 정의한다.

$$D = C_1 + C_2 \tag{4}$$

두 개의 랜덤 변수의 합에 대한 확률 밀도 함수(probability density function, pdf)는 [8]로 부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} P(K, D) &= P(K, C_1) * P(K, C_2) \\ &= \sum_{C_1=0}^{K} P(K, C_1) \cdot P(K, D-C_1) \end{aligned} \tag{5}$$

$*$ 는 컨볼루션(convolution) 연산을 의미한다. 수식(5)에 수식(2)와 (3)를 대입하면 결과식은 일련의 풀이과정을 통하여 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} P(K, D, p_S) &= \sum_{C_1=0}^{K} \frac{K!}{C_1!(K-C_1)!} p_S^{C_1} (1-p_S)^{K-C_1} \\ &\cdot \frac{K!}{(D-C_1)!(K-(D-C_1))!} p_S^{D-C_1} (1-p_S)^{K-(D-C_1)} \\ &= \binom{2K}{D} \frac{p_S^D (p_S-1)^{2K}}{(1-p_S)^D} \end{aligned} \tag{6}$$

수식(6)에서 시간동안 W1,W2 모두 공통적으로 최대 개 이상의 프레임을 전송할 수 없다. 는 무선 전송 환경에 따라 달라질 수 있는 값으로 수식(6)에서 변수로 추가 되었다.

W1과 W2가 동작하는 무선 통신 환경이 상이하여 W2에 W1과 동일한 를 적용할 수 없는 랜덤 변수의 합에 대한 확률 밀도 함수(probability density function, pdf)는 [9]로 부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P(K,D,p_S,q_S)=\frac{K!(1-p_S)^K(1-q_S)^K q_S^D}{D!(1-q_S)^D} \cdot Hyper2F1[-K,-D,1-D+K,\frac{p_S(q_S-1)}{(p_S-1)q_S}] \quad (7)$$

수식(7)에서 와 는 각각 W1과 W2가 임의의 슬롯에서 전송이 성공할 확률이다. 수식(7)에서 대신 을 대입하면 수식(6)과 동일하다.

비교를 위하여 W1 한 개의 무선 통신 칩만을 사용하여 전송하는 경우에 대하여 수식 (6)과 같이 계산해 보면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다.

$$P_{ref}(K,D,p_S)=\binom{K}{D}p_S^D(1-p_S)^{K-D} \quad (8)$$

성능 평가는 다음과 같은 성능 평가 지표에 의하여 평가된다. 는 데이터가 소스에서 생성된 이후 허용 가능한 전송 지연을 의미한다. 값은 하나의 전송 슬롯 시간에 대하여 정규화되어 있으므로, 데이터가 생성이 된 이후에 개의 슬롯 시간 동안 개의 프레임이 전송되어야 목표로 하는 M2M 어플리케이션의 QoS를 만족하게 되는 것이다. 따라서 수식(6)에서 는 M2M 어플리케이션이 요구하는 전송 지연에 의하여 결정된다. 즉 어플리케이션 별로 주어지는 상수 값이 된다. 역시 무선 통신을 위한 주파수 대역에 통신에 참여하고 있는 사용자의 수와 프로토콜 파라미터 값에 의하여 사전에 결정되는 값이다. 따라서 와 가 주어지면 에 의하여 성능이 평가된다.

2.4 무선 결합 전송 성능 평가

우선, 무선 결합 전송의 평균 전송률 증대에 대하여 평가하여 본다. 수식(6)에서 에 대하여 평균 값을 구해보면 다음과 같이 계산된다.

$$T(K,p_S)=\sum_{D=0}^{2*K} D\cdot\binom{2K}{D}\frac{p_S^D(p_S-1)^{2K}}{(1-p_S)^D}=2Kp_S \quad (9)$$

다음으로 수식(8)에서 에 대한 평균 값을 구해 보면 다음과 같다.

$$T_{ref}(K,p_S)=\sum_{D=0}^{K} D\cdot\binom{K}{D}p_S^D(1-p_S)^{K-D}=Kp_S \quad (10)$$

수식(9)와 (10)을 비교하여 보면 두 개의 무선 통신 칩을 사용하는 시스템이 평균적으로 정확히 두 배 더 많은 데이터를 전송하는 것으로 확인된다. 두 배의 무선 자원을 사용하므로 직관적으로 자명한 결과라 할 수 있으며, 수학적으로도 동일한 결과가 도출되었다.

그러나, 본 논문에서 고려하고 있는 임의 접속 기반의 무선 통신 시스템에서 평균 전송률은 큰 의미를 가지지 못한다. M2M 어플리케이션이 요구하는 QoS가 전송률에 대한 요구와 시간 지연에 대한 조건으로 정의되기 때문이다. 따라서 무선 통신칩을 두 배 사용하므로 평균 전송률이 두 배 증대된 것은 큰 의미가 없으며, 주어진 시간 내 정해진 개수의 프레임을 전송하는 것에 성공/실패 여부가 중요하게 된다. 임의 접속의 특성상 아무리 많은 무선 자원이 주어진다고 하여도 단 하나의 프레임도 전송하지 못하는 확률이 0보다 크므로, 수식 (6)과 (8)에 대하여 을 계산해 볼 필요가 있다.

수식 (6)에 대하여 을 계산하여 보면 다음과 같은 결과로 정리됨을 알 수 있다.

$$P(D\geq D_{th}|K,p_S)=\frac{2K!p_S^{D_{th}}(p_S-1)^{2K}}{D_{th}!(2K-D_{th})!(1-p_S)^{D_{th}}} \cdot Hyper2F1(D_{th}-2K,1,1+D_{th},\frac{p_S}{-1+p_S}) \quad (11)$$

동일한 방법으로 수식(8)에 대하여 계산하여 보면 다음과 같이 정리된다.

$$P_{ref}(D\geq D_{th}|K,p_S)=\frac{K!p_S^{D_{th}}(1-p_S)^{K}}{D_{th}!(K-D_{th})!(1-p_S)^{D_{th}}} \cdot Hyper2F1(D_{th}-K,1,1+D_{th},\frac{p_S}{-1+p_S}) \quad (12)$$

간단한 비교를 위하여 이고 인 경우에 대하여 (6)과 (8)을 아래 그림 2와 같이 도시한다.

그림 2를 관찰해 보면 W1과 W2를 동시에 사용하는 경우의 pdf가 W1만 사용하는 경우 대비 우측으로 존재하고 있음을 알 수 있다. 즉, 동일한 시간이 주어졌을 때 좀 더 많은 수의 프레임을 전송할 확률이 높다는 것을 의미한다. 이러한 확률의 차이는 전송 가능한 평균 데이터 량 관점에서 두 배 차이라고 수식(9)와 (10)에서 보인 바 있다. 그러나 그림 2가 내포하고 있는 결과는 그 이상이다. 예를 들면 20개의 시간 슬롯 동안 12개의 프레임을 전송해야 하는 M2M 어플리케이션의 경우 W1

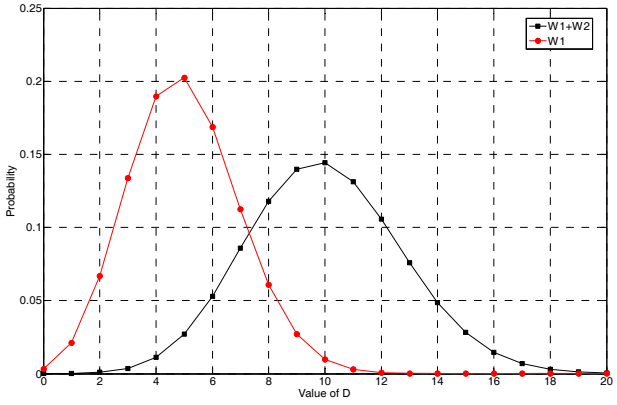

그림 2 D의 값에 따른 전송 가능 확률

Fig. 2 Transmission probability depending on D

만 사용하게 되면 전송이 불가능하다. 그러나 W1과 W2를 동시에 사용하게 되면 20 퍼센트 이상의 확률로 지원이 가능하다. 하나의 예에 불과하지만, W1만 사용하는 것은 W1과 W2를 동시에 사용하는 것 대비 전송률이 절반에 불과한 것이 아니라 M2M 어플리케이션의 QoS 요구에 따라 무선 통신 사용 자체가 불가능할 수 있다.

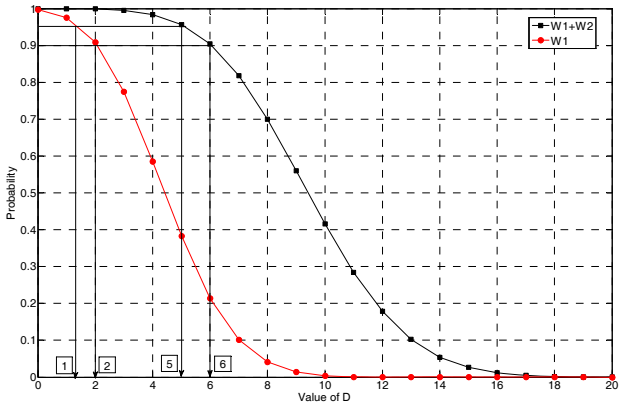

그림 3 D의 값에 따른 QoS 만족 확률
Fig. 3 QoS-satisfaction probability

그림 3에는 수식(11)와 (12)를 도시하였다. M2M 어플리케이션이 요구하는 QoS는 95 퍼센트 이상 만족되어야 하는 경우를 고려해 본다. 이 때 W1만 사용하게 되면 한 개의 프레임만으로 데이터 전송률을 지원할 수 있는 어플리케이션만 사용할 수 있다. 그러나 W1과 W2를 동시에 사용하게 되는 경우 다섯 개의 프레임을 전송하고도 전송 지연에 대한 QoS를 95 퍼센트 이상 만족시킬 수 있으므로 실질적인 전송률은 W1만 사용하는 상황 대비 다섯 배 증대된다. M2M 어플리케이션이 요구하는 QoS가 90 퍼센트만 만족해도 되는 상황을 고려하여 보면, W1은 2개의 프레임 전송을 할 수 있지만, W1과 W2를 동시에 사용하면 6개의 프레임을 전송할 수 있으므로 실질적인 전송률은 결합 전송에 의하여 세 배가 된다.

그림 3에 도시된 결과를 정량적으로 측정해 보기 위하여 새로운 성능 평가 지표(performance metric)를 다음과 같이 정의한다.

$$T_{gain} = \frac{D_{W1+W2}^{\min}}{D_{W1}^{\min}} \tag{13}$$

식(13)에서 $D_{W1+W2}^{\min}$은 $D_{W1+W2}^{\min} = \min D s.t. P(K,D,p_S) \geq P_{th}$으로 정의된다. 동일한 방법으로 $D_{W1}^{\min}$은 $D_{W1}^{\min} = \min D\ s.t.\ P_{ref}(K,D,p_S) \geq P_{th}$으로 정의된다. P_{th}는 전송 지연이 발생하지 않을 임계 확률을 의미하는 것으로 본 논문에서 0.99, 0.95, 0.9 값을 사용한다. 이러한 평가 지표를 개발하여 사용함으로써 M2M 어플리케이션의 QoS를 합리적으로 보장하면서 전송할 수 있는 최대 데이터 량을 측정할 수 있다. 수식(9)와 (10)에서 계산한 평균 전송률과는 달리 QoS를 보장하는 실질적인 전송률의 차이를 측정할 수 있는 수식(13)의 T_{gain}을 결합 전송의 실질 전송률 이득(practical throughput gain)으로 명명하며, 그 결과는 그림 4에 도시하였다.

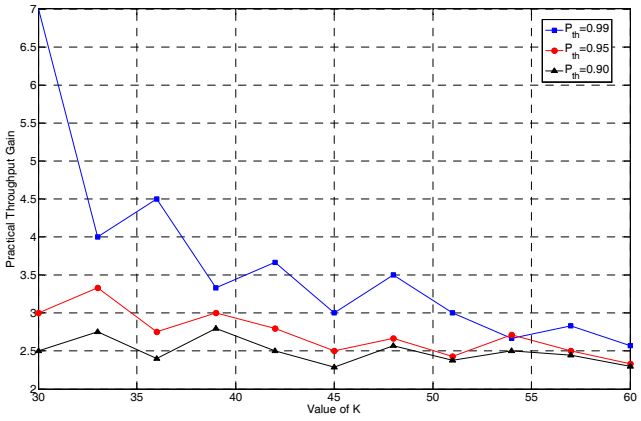

그림 4 전송률 이득
Fig. 4 Throughput gain

M2M 어플리케이션이 요구하는 전송 지연 허용한도 내에서 통신하게 될 확률을 99 퍼센트로 제한하는 경우 값에 따라 결합 전송하면 단일 통신 칩으로 전송하는 것 대비 일곱 배의 전송률 이득이 발생한다. 값이 증가함에 따라 수식(13)에서 정의한 실질 전송률 이득이 감소하는 추세를 보이는 것은 전송 지연 허용 시간이 늘어나는 경우이므로 결합 전송에 의한 전송 시간 단축 효과가 덜 민감하게 작용하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 수식 (9)와 (10)에서 분석한 바와 같이 결합 전송의 전송률이 단일 통신 칩 전송 대비 산술적으로 평균 두 배 높은 것 이상의 실질 전송률 이득이 발생하고 있음을 그림 4의 결과에서 확인할 수 있다.

그림 4의 결과로부터 결합 전송에 따른 실질 전송률 이득이 값이 커짐에 따라 큰 값을 보이는 것은 결합 전송이 전송 지연에 민감한 M2M 어플리케이션에서 더 큰 효과를 보인다는 것이다. 예를 들어 음성 통화를 위한 어플리케이션의 경우 전송 지연 시간에 매우 민감하며 실시간(real-time) 어플리케이션으로 분류된다. 또는 영상을 실시간으로 전송해야 하는 경우 또한 전송 지연 시간에 매우 민감하다. 이러한 어플리케이션 데이터를 무선으로 전송해야 하는 경우 범용으로 사용할 수 있는 무선 통신 칩을 복수 개 사용하여 전송 지연을 현저히 줄일 수 있음을 본 논문을 통하여 밝힐 수 있으며, 그러한 개선에 대한 정량적인 관계가 수식(11)-(13)에 의하여 계산될 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 M2M 어플리케이션을 구현하기 위하여 복수의 무선 통신 칩으로 결합 전송이 가능한 플랫폼에 대한 전송률과 전송 지연에 대하여 분석하였다. 대부분의 통신 칩에서 사용하고 있는 임의 접속 환경을 반영하였다. 두 개의 통신 칩을 사용하여 결합 전송을 하는 경우 평균 전송률은 하나의 통신 칩만 사용하는 상황 대비 정확히 두 배 증가함이 증명되었다. 그러나 평균 전송률과 달리 M2M 어플리케이션이 요구하는 전송 지연 QoS를 반영하는 경우 두 개의 통신 칩을 이용하여 결합 전송하게 되면 실질 전송률 이득이 2.5~7배 증가하며, 전송 지연에 대한 민감도가 높은 어플리케이션일수록 실질 전송률 이득이 높으므로 결합 전송을 활용하는 것이 바람직한 실시간 어

플리케이션 구현 방향이라는 것을 밝혔다. 모든 결과는 수식으로 유도되어 증명되었으며, 이 결과를 이용하여 복수의 무선 통신칩을 이용하여 결합 전송하는 플랫폼의 전송 지연 개선 결과를 정확하게 예측해 볼 수 있다.

References

[1] Jaewoo Kim, Jaiyong Lee, Jaeho Kim and Jaeseok Yun, "M2M Service Platforms: Survey, Issues, and Enabling Technologies," IEEE TCommunications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 1, pp. 61-76, Jan. 2014

[2] M. Hasan, E. Hossain and D. Niyato, "Random access for machine-to-machine communication in LTE-advanced networks: issues and approaches," IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 6, pp. 86-93, Jun., 2013

[3] Z. Fan, R. Haines, P. Kulkarni, "M2M communications for E-health and smart grid: an industry and standard perspective," IEEE Wireless Communications, vol. 21, no. 1, pp. 62-69, Jan., 2014

[4] S. Lohier, A. Rachedi, I. Salhi, E. Livolant, "Multichannel access for bandwidth improvement in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," Wireless Days (WD), 2011 IFIP, 2011

[5] S. Pollin, M. Ergen, S. Ergen, "Performance Analysis of Slotted Carrier Sense IEEE 802.15.4 Medium Access Layer," IEEE Transactions on Wireless Communications, , vol. 7, no. 9, pp. 3359-3371, Sep., 2008

[6] N. Tadayon, W. Honggang, D. Kasilingam, "Analytical Modeling of Medium-Access Delay for Cooperative Wireless Networks Over Rayleigh Fading Channels ," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no. 1, pp. 349-359, Jan., 2013

[7] G. Bianchi, "Remarks on IEEE 802.11 DCF performance analysis," IEEE Communications Letters, vol. 9, no. 8, pp. 765-767, Aug. 2005

[8] P. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Process, McGraw Hill, 2002

[9] M. Abramowitz and I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions, Dover, 1965

저 자 소 개

왕 한 호 (王 瀚 鎬)

저자는 연세대학교 전기전자공학과에서 2004년과 2010년에 각각 학사, 박사 졸업하였다. 현재 상명대학교 정보통신공학과 조교수로 근무하고 있다. 연구 관심 분야는 셀룰러 시스템, 인지 무선 통신 시스템이다.

우 중 재 (禹 重 在)

연세대학교 전기전자공학과에서 2007년 박사학위를 취득하고, 2009년까지 삼성전자 통신연구소에서 근무하였다. 현재한서대학교에서 조교수 재직중이며. 연구 관심 분야는 셀룰러 시스템, 및 임베디드 시스템이다.