

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.3.23>
JIIBC 2021-3-4

Wi-SUN에서 비동기 CSL모드 MAC의 지연시간 분석

Delay Time Analysis of Asynchronous CSL Mode MAC in Wi-SUN

김동원*

Dongwon Kim*

요약 근래에 와서 유틸리티들을 무선으로 원격제어 하는 스마트 팩토리 무선 이동 통신 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Wi-SUN(Wireless Smart Utility Network) 얼라이언스에서는 IEEE802.15.4g/e에 기반한 새로운 무선 통신 표준화 규격으로 스마트팩토리와 같은 플랫폼 구축에 적합한 Wi-SUN 프로토콜 구조를 제시하였다. IEEE802.15.4e의 CSL(Coordinated Sampled Listening) 모드 MAC(Media Access Control)의 지연시간 측면의 성능을 분석하고 효율적 운용을 위한 고려 사항을 살펴본다.

Abstract In recent years, research on smart factory wireless mobile communication technology that wirelessly remotely controls utilities is being actively conducted. The Wi-SUN(Wireless Smart Utility Network) Alliance proposed Wi-SUN protocol structure suitable for building a platform such as a smart factory as a new wireless communication standardization standard based on IEEE802.15.4g/e. It analyzes the performance of the IEEE802.15.4e CSL(Coordinated Sampled Listening) Mode MAC(Media Access Control) in terms of latency and looks at considerations for efficient operation.

Key Words : Wi-SUN, IEEE802.15.4g/e, Coordinated Sampled Listening, performance analysis

1. 서론

근래에 스마트 유틸리티(Smart Utility)를 탑재 한 전기, 가스, 수도 계량기 등과 같은 무선 스마트 유틸리티 네트워크 (Wi-SUN) 통신 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다.^{1), 2) 기}

Wi-SUN 구조를 살펴보면 유틸리티 무선 장치는 다중 홉 작업을 통해 측정 데이터를 무선으로 데이터 수집 기지국에 효과적이고 자동으로 릴레이 하는 것이며, 기

지국은 데이터를 무선 WAN (Wide Area Network)을 통해 인트라넷 또는 인터넷의 클라우드 또는 데이터 서버로 전송하는 일반적인 구조를 취하고 있다.

여기서 무선 스마트 유틸리티 네트워크 Wi-SUN의 물리 (PHY) 계층 사양은 주로 실외 저속 데이터 전송률 무선 스마트 계량 유틸리티 네트워크에 대한 대체 물리 계층 사양을 정의하는 IEEE 802.15.4g를 기반으로 한다. 또한 Wi-SUN에는 여러 애플리케이션을 지원하기 위해 IEEE 및 IETF에서 표준화 한 MAC, 적응, 네트워

*정회원, 충북도립대학교 반도체전자과
접수일자 2021년 4월 21일, 수정완료 2021년 5월 21일
게재확정일자 2021년 6월 4일

Received: 21 April, 2021 / Revised: 21 May, 2021 /
Accepted: 4 June, 2021

*Corresponding Author: won@cpu.ac.kr
Professor, Dept. of Semiconductor Electronics, Chungbuk Prov.
Univ., Korea

크 및 전송 계층 프로토콜의 추가 사양이 포함되어 있다.

Wi-SUN 얼라이언스에서 정의한 기술 사양을 Wi-SUN 프로파일이라 하며 Wi-SUN 프로파일 중 하나는 일본 전기 스마트 미터의 무선 장치와 HEMS (Home Energy Management System) 간의 통신 사양으로 성공적으로 사용되고 있다. 향후 Wi-SUN의 새로운 응용 분야가 고려되고 있는 분야로써는 현재 농업, 방재 및 지능형 교통 시스템이 제안되고 있다.

본 논문에서는 Wi-SUN MAC인 IEEE802.15.4e의 비동기 CSL모드 성능분석을 위한 분석적 모델을 살펴보고 지연시간 측면의 효율적 운용을 위한 고려 사항을 살펴본다.

II. Wi-SUN^[1,2]

Wi-SUN 통신시스템은 응용에 따라 크게 3개의 범주로 나누어진다. 범주 (a)는 광역 개방 공간 환경에서 정보 감지 및 모니터링 시스템이다. 이 범주는 고정 지점 간 통신을 기반으로 하며 적용 범위는 1-5km이다.

범주 (b)는 광역 도시 환경에서 정보 감지 및 모니터링 시스템이다. BS는 건물에 장착되어 있으며 Wi-SUN의 주택 및 / 또는 상점이 설치된 센서, 미터 및 / 또는 모니터의 무선 장치와 통신한다. 통신은 주로 가시선이 아니므로 BS와 무선 장치 간의 직접 통신을 사용할 수 없다. 이 경우 무선 장치간에 Wi-SUN 라우터를 통해 다중 홉 작업을 사용할 수 있다.

범주 (c)는 광역 이동 통신 환경에서 정보 감지 및 모니터링 시스템이다. BS는 건물에 장착되어 있으며 자동차 및 버스와 같은 차량이 장착 된 센서 및 / 또는 모

표 1. Wi-SUN의 범주
Table 1. Categories of Wi-SUN

Category	(a) Wide area open space communication	(b) Wide area urban area communication	(c) Wide area mobile communication
Applications	<ul style="list-style-type: none"> Sensor, meter and/or monitor network for Energy management, Agriculture, disaster prevention, animal husbandry, and so on 	<ul style="list-style-type: none"> Information distribution, digital signage to building and store Sensing and monitoring for building and store (smart city) Sensing and monitoring from smartphone via Wi-SUN router 	<ul style="list-style-type: none"> Collection of sensing data from vehicles such as car and bus Control and management of vehicles
Frequency, Typical data rate	Sub-GHz bands (mainly 800-900 MHz bands), 50, 100, 150 kbps		
Transmission power	AP: 20 mW, 250 mW Terminal: 20 mW	AP: 20 mW, 250 mW Terminal, router: 20 mW	AP: 20 mW, 250 mW Terminal: 20 mW
Antenna configuration	AP TX: Compliant with regulation in each region AP RX: Multiple antennas. Diversity reception may be used. Terminal: Compliant with regulation in each region		
Antenna height	> 4 m		
Coverage area	1 km-5 km	100 m-2 km	100 m-2 km
Radio propagation	Line-of-sight	Non line-of-sight	Non line-of-sight
Path-loss model	Okumura-Hata model	Walfrisch-Ikegami model	Walfrisch-Ikegami model
Fading model	Multipath fading	Multipath fading (e.g. GSM typical urban (TU) model)	
Terminal radio devices	Fixed installation	Basically fixed installation	Installation in vehicle Vehicle speed: 40-80 km/h
Multi-hop support	May be needed to extend its coverage area and/or to keep high reliability.		

터의 무선 장치와 통신한다. 시스템의 타당성 문제는 Wi-SUN 무선 장치에 기능을 추가하여 모바일 환경에서 센서, 미터 또는 모니터 정보를 수신하는 것이다.

Wi-SUN 통신 시스템을 구현하고 그림 1과 표 1의 구성 및 요구 사항을 달성하기 위한 핵심 표준은 IEEE 802.15.4g 및 IEEE802.15.4.4e이다. 이들은 각각 PHY 및 MAC 계층 표준을 말한다.

1. IEEE802.15.4g^[3]

IEEE 802.15.4g는 IEEE 802.15.4의 수정 사항을 정의한다. 주로 실외 저속 데이터 무선 스마트 미터링 유틸리티 네트워크 요구 사항을 해결한다. 대체 PHY 및 구현을 지원하는 데 필요한 MAC 수정만 정의한다.

표 2. IEEE 802.15.4g 변조 및 주파수

Table 2. IEEE 802.15.4g modulation and frequency

Frequency band (MHz)	Modulation	Bit rate (kbps)	Channel Spacing (kHz)	Total Number of channels	Modulation index
470-510 (China)	Filtered 2FSK*	50	200	199	1.0
	Filtered 2FSK	100	400	99	1.0
	Filtered 4FSK	200	400	99	0.33
779-787 (China)	Filtered 2FSK*	50	200	39	1.0
	Filtered 2FSK	100	400	19	1.0
	Filtered 4FSK	200	400	19	0.33
863-870 (Europe)	Filtered 2FSK*	50	200	34	1.0
	Filtered 2FSK	100	400	17	1.0
	Filtered 4FSK	200	400	34	0.33
902-928 (US)	Filtered 2FSK*	50	200	129	1.0
	Filtered 2FSK	150	400	64	0.5
	Filtered 2FSK	200	400	64	0.5
917-923.5 (Korea)	Filtered 2FSK*	50	200	32	1.0
	Filtered 2FSK	150	400	16	0.5
	Filtered 2FSK	200	400	16	0.5
920-928 (Japan)	Filtered 2FSK*	50	200	38	1.0
	Filtered 2FSK*	100	400	18	1.0
	Filtered 2FSK	200	600	12	1.0
	Filtered 4FSK	400	600	12	0.33

* denotes mandatory transmission mode.

IEEE 802.15.4g는 multi-rate and multi-regional (MR-) FSK, MR-offset QPSK 그리고 MR-OFDM의 세 가지 PHY를 채택한다. PHY에서 MR-FSK는 가장 상용화 된 PHY이다.

표 2에는 50kbit / s 이상의 데이터 속도를 사용할 수 있는 작동 주파수 대역이 각 나라별로 요약되어 있다.

표에는 변조, 비트 전송률, 채널 간격, 총 채널 수 및 변조 지수도 요약되어 있다. MR-FSK에는 두 가지 모드가 있는바 무선 장치에서 구현해야 하는 필수 전송 모드와 표 2에 표시된 선택적 전송 모드이다.

2. IEEE802.15.4e^[4]

IEEE 802.15.4e는 IEEE 802.15.4TM-2006MAC에

기능을 강화하고 추가하기위한 수정안을 정의한다. 기능 중 하나는 저에너지 소비 MAC이다.

IEEE 802.15.4 및 IEEE 802.15.4e MAC은 동기 및 비동기의 두 가지로 분류된다. 동기식 MAC에는 비콘 기반 및 채널 호핑 기반 MAC의 두 가지 범주가 있다. 또한 비동기 MAC에는 CSMA/CA, CSL (Coordinated Sampled Listening) 및 RIT (receiver initiated transmission) 의 세 가지 MAC이 있다.

CSMA 프로토콜은 발신자에서 데이터 생성이 발생하면 무선 장치는 반송파 감지라는 수신 작업을 수행한 후, 기기가 반송파 신호를 감지하지 못하면 기기는 원하는 파트너, 즉 수신기로 데이터를 전송한다. 기기가 반송파 신호를 감지하면 데이터 전송을 중단하고 임의로 결정된 일정 시간 동안 기다린 후 재전송을 시도하는 가장 간단한 방식으로 무선액세스의 기본 방식이지만 효율성이 떨어진다.

CSMA에서 저전력 운영 MAC으로 개선된 CSL과 RIT가 제안되었고 주기적인 웨이크 업 및 절전 동작은 채널당 높은 시간 활용 효율과 전력 소비에 이점이 있는 RIT 프로토콜은 지연 허용 오차가 있는 다중 홉 Wi-SUN 네트워크에 효율적이어서 Wi-SUN 표준으로 채택되었다.

III. 성능 분석

1. IEEE802.15.4 throughput 및 delay^[5]

가능한 최대 throughput 및 최소 지연을 구하기 위하여 시스템은 최적의 전송 조건에 있다고 다음과 같이 가정한다.

- 1) 채널 에러가 없는 이상 채널로 가정
- 2) 어떤 전송 사이클에서도 단지 한 개의 액티브 스테이션이 항상 전송하고자하는 한 개의 패킷을 가지

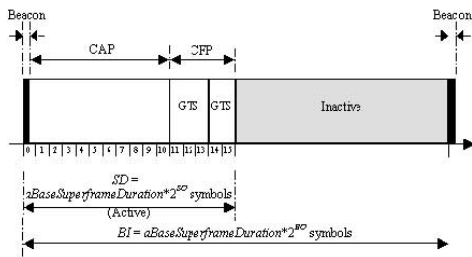


그림 1. IEEE802.15.4 송수신 타이밍도
 Fig. 1. Send/Receive timing diagram in IEEE802.15.4

고 있고, 나머지 다른 스테이션들은 그 패킷을 받고 ACK를 제공할 수 있다고 본다.

- 평균 최소 backoff 시간

$$Backoff_Time = a\ Random\ Number\ [0::2^{BE} - 1] \times BackoffSlot_Time \quad (1)$$

으로 주어지므로 평균 backoff 시간은 다음 식과 같다.

$$\overline{Backoff_Time} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=0}^{NB} (2^{macMinBE+i} - 1) \times BackoffSlot_Time \right) \quad (2)$$

여기서, $(macMinBE=3) \leq BE \leq (macMaxBE=5)$, NB: Number of Backoff ($= macMaxCSMABackoffs$ 이다.

백오프(backoff) 후 채널 클리어(clear) 정보를 검출했을 때 CW(Contention Window)가 0이 될 때까지 2 연속 CCA(Clear Channel Assessment) 동작으로 $2 * BackoffSlot_Time$ 이 걸린다. 따라서 하나의 충돌 윈도우 $CW = 2 * BackoffSlot_Time = 640\mu s$ 가 된다.

- DATA 전송지연시간

$$T_{D-DATA} = \frac{L_{SHR} + L_{MHR-DATA} + L_{DATA} + L_{MFR} + L_{PHR}}{R_{rate}} \quad (3)$$

- ACK 전송지연시간

$$T_{D-ACK} = \frac{L_{SHR} + L_{MHR-ACK} + L_{ACK} + L_{MFR} + L_{PHR}}{R_{rate}} \quad (4)$$

- 최대 throughput

한 개의 데이터 패킷을 완전히 상대방에게 전달시키기 위해 소요되는 시간을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{ToDim15.4} = T_{D-DATA} + t_{ack} + T_{D-ACK} + 2\tau + \overline{Backoff_Time} + 2BackoffSlot_Time + LIFS + SIFS \quad (5)$$

최대 throughput은 다음과 같다.

$$Max.Throughput = \frac{L_{DATA}}{T_{ToDim15.4}} \quad (6)$$

이때 안정조건(stable condition)은 $T_{ToDim15.4} \leq t_{SI} - t_{SLEEP}$ 이 만족되어야 한다.

- 최소 delay

$$Min.Delay = T_{D-DATA} + \tau + \overline{Backoff_Time} + 2BackoffSlot_Time + \frac{t_{SLEEP}}{2} \quad (7)$$

2. Wi-SUN CSL 모드 throughput 및 delay

그림 2는 CSL 프로토콜의 작동을 보여준다. 각 무선 장치는 MAC CSL 기간이라고하는 고정 된 간격으로 채널 샘플링이라는 주기적 수신 작업을 수행한다. 이러한 주기를 CSL체크인터벌(t_{CSL})이라하며 carrier sense 시간을 나타내는 $t_{carriersense}$ 과 sleep 시간을 나타내는 t_{sleep} 의 합으로 주어진다.

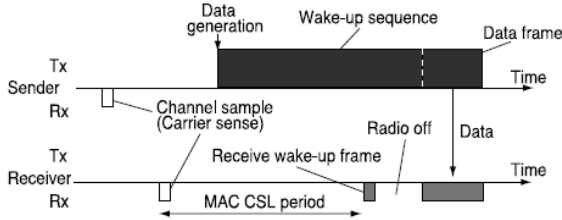


그림 2. CSL모드 송수신 타이밍도
Fig. 2. Send/Receive timing diagram in CSL mode

발신자에서 데이터 생성이 발생하면 발신자는 웨이크업 시퀀스의 연속 전송을 수행한다. 웨이크업시퀀스는 MAC CSL 기간(MAC CSL period)을 초과하는 기간 동안 지속적으로 전송되어야 한다. 웨이크업시퀀스(wakeup sequence) 전송이 끝나면 발신자는 생성 된 데이터 프레임에 원하는 파트너, 즉 수신자에게 전달한다.

송신단의 경우는 송신할 패킷이 도달했을 경우 채널을 확인하기 전에 백 오프 시간 동안 대기한다. 채널이 깨끗하면 노드는 전송한다. 그렇지 않으면 두 번째 백 오프를 시작한다. 각 노드는 LPL을 사용하여 주기적으로 채널을 확인해야 합니다. 채널이 idle 상태이고 노드가 전송할 데이터가 없다면, 노드는 sleep하게 된다 .

따라서 CSL 모드에서의 백오프는 IEEE802.15.4의 백오프 방식과 CCA 동작을 그대로 쓴다고 가정한다. 동일한 조건하에서 미디어 접근 성능의 비교를 위하여 IEEE802.15.4와 동일한 TD-DATA, TD-ACK를 쓴다고 가정한다.

- 최대 throughput

CSL모드에서 한 개의 데이터 패킷을 완전히 상대방에게 전달시키기 위해 소요되는 시간을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TToDinCSL = t_{wakeupsequence} + T_{D-DATA} + t_{ack} \quad (8) \\ + T_{D-ACK} + 2\tau + Backoff_Time \\ + 2BackoffSlot_Time$$

여기서 $t_{wakeupsequence} \geq t_{CSL}$ 가 되어야 된다. 안정조건은 offered load $\rho = \lambda \cdot TToDinCSL < 1$ 이 될 때이다.

CSL모드의 최대 throughput은 다음과 같다.

$$Max.Throughput = \frac{L_{DATA}}{TToDinCSL} \quad (9)$$

- 최소 delay

$$Min.Delay = t_{wakeupsequence} + T_{D-DATA} + \tau \quad (10) \\ + Backoff_Time + 2BackoffSlot_Time$$

3. Analysis

성능해석에 사용된 네트워크 파라미터는 다음 표와 같다.

표 3. 네트워크 파라미터^{[3][4][6]}
Table 3. Network Parameter^{[3][4][6]}

parameter	value
R_{ate}	250Kbps
τ (propagation delay)	1us
L_{SHR} (5B)	160us
L_{PHR} (1B)	32us
t_{ack}	$12symbol(192\mu s) \leq t_{ack} \leq 32Symbol(512\mu s)$
$LIFS$	40 symbol=640us
$SIFS$	12 symbol=192us
$macMaxCSMABackoffs$	2
$macMinBE$	3
$macMaxBE$	5
$BackoffSlot_Time$	20symbols=320us
t_{SI}	450ms
t_{CSL}	450ms
$t_{wakeupsequence}(CSL)$	$\geq t_{CSL}$
$t_{carriersense}(CSL)$	40symbols=640us

그림 3에서 CSL체크 인터벌 길이와 sleep 길이를 동일하게 설정한후 100바이트 단일 패킷을 일정율로 전송하는데 따른 offered load를 비교하면 CSL 체크인터벌이 짧을수록 웨이크업시퀀스의 길이가 짧아도 됨으로 offered load에 영향이 적다. 즉, CSL 체크 인터벌을 길게하면 긴 웨이크업시퀀스가 오버헤드 부하로 작용하여 offered load를 크게 하고 throughput을 감소시키게 된다. 반면 IEEE902.15.4는 이러한 오버헤드가 발생하

지 않으므로 동일한 트래픽에 대해 동일한 offered load를 나타낸다.

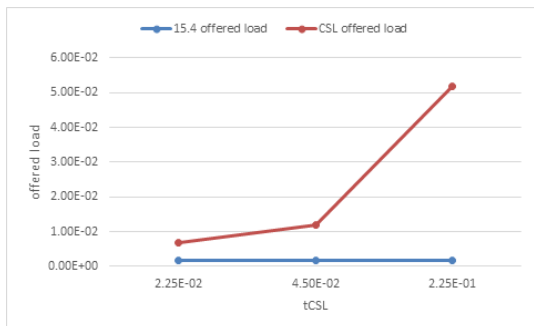


그림 3. CSL 인터벌에 따른 offered load
 Fig. 3. Offered load according to CSL interval

동일 조건에서 지연시간과 throughput을 비교하면 그림 4, 그림 5과 같다. CSL의 CSL체크인터벌이 짧아질수록 지연시간이 작아지며 IEEE802.15.4는 sleep 길이가 짧아질수록 지연시간이 적게 걸림을 알 수 있다.

이는 IEEE802.15.4의 sleep 길이가 짧아질수록 네트워크 전대역을 트래픽 수송에 쓸 수 있게 됨으로 throughput은 올라가고 delay는 감소하게 된다. CSL의 CSL체크인터벌을 짧게 가져갈수록 웨이크업시퀀스 길이가 감소하게 되고 매 타임슬롯 캐리어 센싱을 통해 수신을 확인하는 sleep이 없는 IEEE802.15.4와 특성이 같아지게 됨을 볼 수 있다.

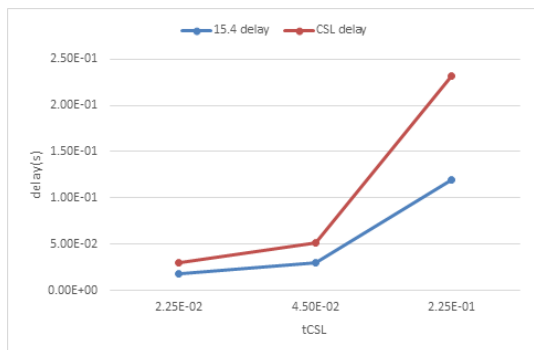


그림 4. CSL 인터벌에 따른 지연시간
 Fig. 4. Delay according to CSL interval

그림 5에서는 CSL의 최대 throughput은 CSL인터벌을 짧게 할수록 IEEE802.15.4의 최대 throughput과 같아지며, CSL인터벌이 길어질수록 웨이크업시퀀스 전송 길이가 길어짐으로 인해 오버헤드가 커져 throughput이 감소한다.

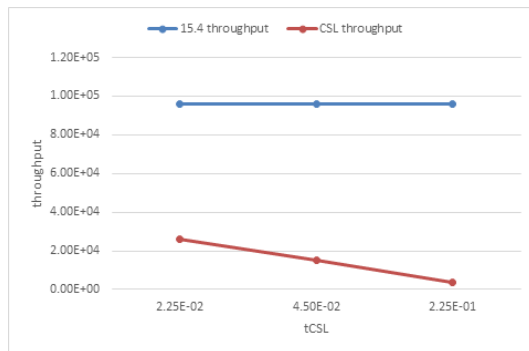


그림 5. CSL 인터벌에 따른 스루풋
 Fig. 5. Throughput according to CSL interval

따라서 CSL은 CSL체크인터벌을 짧게 가져갈수록 IEEE802.15.4와 throughput은 비슷하게 나타나며, 패킷길이가 길어질수록 오버헤드의 영향이 줄어들므로 최대 throughput을 나타내게 된다. 하지만 그림 6에서 보듯이 비동기 방식의 웨이크업시퀀스 전송 오버헤드로 인해 IEEE802.15.4의 성능을 넘어 갈수는 없음을 알 수 있다.

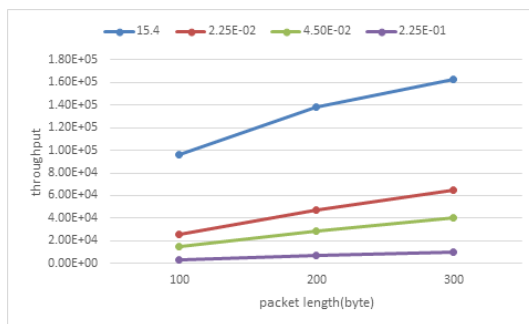


그림 6. 패킷길이에 따른 스루풋
 Fig. 6. throughput according to packet length

IV. 결 론

Wi-SUN을 위한 저전력 MAC 표준으로 제안되어 있는 CSL MAC을 센서네트워크 표준의 기본이 되는 IEEE802.15.4와 최대 throughput과 최소 delay 관점에서 살펴보고 비교하였다. 단일 패킷을 전송하는데 따른 throughput과 delay 시간을 비교하면 sleep 길이가 길어질수록 IEEE802.15.4의 지연시간이 길어지며, CSL 모드는 CSL인터벌이 길어질수록 delay 시간이 길어지고 throughput이 떨어짐을 볼 수 있다. 트래픽 부하가 커

질수록 CSL인터벌을 짧게 운용하면 지연시간도 짧아지면서 throughput을 높일 수 있음을 보였다. 트래픽 특성에 따라 CSL인터벌을 적절히 설정하면 기존의 IEEE802.15.4보다도 매우 우수하게 나타남을 보여준다.

References

- [1] [http:// www.wi-sun.org](http://www.wi-sun.org), Wi-SUN Alliance
- [2] H. Harada, K. Mizutani, K. Mochizuki, and K. Obata, "IEEE802.15.4g based wide area and mobile Wi-SUN communication systems," IEICE TRANS. COMMUN., VOL.E100-B, NO.7 JULY 2017
- [3] IEEE 802.15.4g-2012 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks, IEEE Std 802.15.4g-2012, April. 2012.
- [4] 802.15.4e-2012 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer, IEEE Std 802.15.4e-2012, April. 2012.
- [5] Dongwon Kim, Mi-Hee Youn, "Delay time Analysis by Adjusting of Check Interval in Asynchronous Wireless Sensor Network," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), VOL. 20 NO. 2, pp. 75~80, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.2.75>
- [6] <http://www.atmel.com/images/doc8111.pdf>, AT86RF231 datasheet
- [7] Lim Joonsun, , You Sebok, Cho Soojin, Park Byungho, Kim Yangsoo, and Jang Jinwoon, "Based on Intelligent Wireless Sensing System for Safety of Urban Facilities," Journal of KIIT. Vol. 18, No. 1, pp. 143-156, 2020.
DOI : <https://doi.org/10.14801/jkiit.2020.18.1.143>

저 자 소 개

김 동 원(정회원)

•2018년 제18권 제1호 참조