

WPTS BLE 비콘 기반 센서 네트워크 구축 방안 연구

장호덕*

Study on the Building Method of a Sensor Network based on BLE Beacons with WPTS

Ho-Deok Jang*

요약 본 논문에서는 RF (Radio Frequency) 에너지 하베스팅 센서 노드의 설계 방안과 CATV 망과 누설 동축 케이블 (leaky coaxial cable)을 활용한 센서 네트워크 구축 방안을 연구하였다. 센서 노드는 915MHz 주파수 대역에서 동작하는 WPTS (Wireless Power Transfer System) 전력 수신기로 전원공급부를 설계하였다. WOC (WiFi over Coax) 기술을 활용하여 CATV 망으로 센서의 BLE 무선통신 신호와 WPTS 전력 송신기 신호를 전송하고, 누설 동축 케이블로 RF 신호를 방사시키는 센서 네트워크 구축 방안을 제안하였다. 센서 네트워크를 구축하는 지점에 누설 동축 케이블을 활용하면 센서 노드의 수신 신호 강도 지표가 허용되는 최소값 (-78dBm)을 만족하는 지점까지 센서 네트워크의 커버리지를 확장할 수 있다.

Abstract This paper investigates the method to implement a RF (Radio Frequency) energy harvesting sensor node and to build a sensor network using a CATV network and a leaky coaxial cable. The power supply of a sensor node is designed with the WPTS (Wireless Power Transfer System) receiver operating at 915MHz. A sensor network has limited coverage by the loss of RF signal at a wireless transmission link. The paper proposes to build a sensor network that the BLE signal of a sensor and the signal of a WPTS power transmitter are transmitted through a coaxial cable of a CATV network by utilizing WOC (WiFi over Coax) technology and radiates at a leaky coaxial cable. The length of a leaky coaxial cable and the total loss of a wire link are allowed to the point that the RSSI of a sensor node is more than the minimum value (-78dBm) and lead to extend wireless coverage.

Key Words : BLE, CATV, Leaky Coaxial Cable, Sensor Network, WOC, WPTS

1. 서론

IoT (Internet of Things; 사물인터넷)는 4차 산업혁명의 핵심기술이며, 홈 오토메이션, 보안, 의료 및 헬스케어, 에너지, 제조 등 다양한 분야에 널리 적용되고 있다. 가정에서 사용할 수 있는 IoT 상품을 통신사에서 출시하여 일반인들도 서비스를 이용할 수 있다. 사물인터넷을 구현하기 위해서는 데이터를 수집하는 센서, 데이터를 주고받기 위한 통신 네트워크 인프라,

그리고 수집한 데이터를 처리하여 유용한 정보를 제공할 수 있는 서비스 인터페이스 기술이 필요하다.

센서는 사물인터넷의 기본 구성요소로서 자연환경과 생활환경에서 사물인터넷 서비스를 제공하기 위한 날씨, 건강 상태 등의 데이터를 수집하는 역할을 하게 된다. 센서의 동작을 위한 전력은 배터리에서 공급되며, 전력 소모가 작은 TinyOS, Nano-Qplus 등의 초소형 운영체제가 사용되고 있지만 배터리 교체 등 유지보수 문제를 가지고 있다. 주변의 모든 사물에 부착

This paper was supported by research fund of Dongyang Mirae University in 2021.

*Department of Information & Communication Engineering, Dongyang Mirae University

Received January 12, 2022

Revised January 26, 2022

Accepted February 04, 2022

될 수 있는 센서는 수집한 데이터를 게이트웨이로 전송할 수 있는 통신 네트워크를 필요로 한다. 일반적인 센서 네트워크는 근거리 무선통신 기술을 활용하여 데이터를 수집하는 센서 노드 (sensor node)와 게이트웨이와 연결되는 싱크 노드 (sink node)가 통신을 하게 되며, 무선 링크 구간에서 발생하는 RF 신호의 전송 손실로 인해서 커버리지 확장에 제약이 있다. 최근 RF 신호의 높은 전송 손실로 인해서 동축 케이블 유선 링크 구간을 활용하는 CATV 망 기반의 센서 네트워크 구축 방안이 연구되고 있다. 기존 CATV 망에 혼합분리기를 이용하여 싱크 노드를 설치하고, 센서 네트워크 구성 지점에 혼합분리기와 2.4GHz 안테나를 설치하여 센서 노드와 통신을 하는 무선 센서 네트워크를 구축하는 방안이다[1].

본 논문에서는 배터리로 동작하는 센서의 유한한 에너지 공급 문제를 해결할 수 있는 에너지 하베스팅 (energy harvesting) 기술과 무선 센서 네트워크 구축 방안을 연구하고자 한다. 에너지 하베스팅은 무선 RF (Radio Frequency) 신호를 에너지원으로 사용하는 WPTS (Wireless Power Transfer System)를 적용하고자 한다[2]. 그리고 센서 네트워크는 전송 거리에 따른 수신 RF 신호 감쇄 문제를 해결하기 위해 CATV 망과 안테나 대신 누설 동축 케이블 (leaky coaxial cable)을 활용한 방안을 제안하고자 한다.

2. WPTS BLE 비콘 설계

센서 노드는 전원공급부, 센서부, 신호처리부, 무선 통신 인터페이스로 구성된다. 센서부는 온습도 센서, 조도 센서, 초음파 센서, 맥박/혈압/혈당을 측정하는 바이오센서 등 응용 분야별 다양한 센서가 사용될 수 있다. 신호처리부는 센서에서 수집한 데이터를 처리해서 싱크 노드와의 통신을 위한 무선통신 인터페이스로 전달하는 기능을 한다. 그림 1은 센서 노드 역할을 하는 WPTS BLE (Bluetooth Low Energy) 비콘의 구성도이다. 전원공급부는 WPTS 전력 수신기로 설계하였고, 안테나, 정류회로인 RF-DC 변환기, 축전 캐패시터, 그리고 PMIC (Power Management IC)로 구성된다.

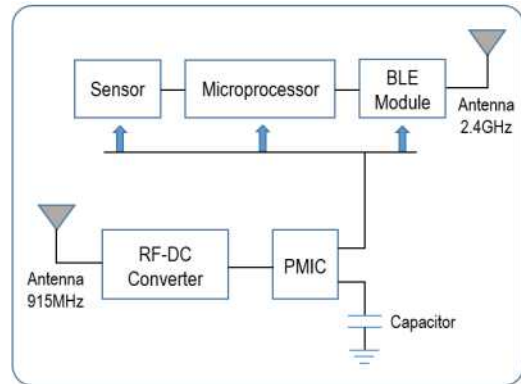


그림 1. WPTS BLE 비콘 센서 노드

Fig. 1. WPTS BLE beacon sensor node

축전 캐패시터는 전하가 방전되어 임계치 보다 작아지면 다시 충전되는 방식으로 동작하기 때문에 일정한 출력 전압을 유지할 수 있다. WPTS 전력 수신기의 RF 주파수 대역은 허용되는 출력 전력의 최대값, 무선 링크 구간에서 발생하는 전송 손실, 그리고 안테나의 크기를 고려하여 915MHz를 선택하였다. RF-DC 변환기의 출력은 축전 캐패시터로 공급되어 충전된다. 센서 노드는 저전력으로 동작하고, 단거리 무선통신에 적합한 BLE 송수신기를 사용하여 싱크 노드와 통신하도록 설계하였다[3].

그림 2는 센서 노드의 WPTS 전력 수신기로 수신되는 RF 신호 전력을 Friis 방정식으로 수치 해석한 결과이다[4]. 사용한 안테나는 패치 (patch) 안테나와 PCB 다이폴 안테나이다. 표 1은 Friis 방정식에서 사용한 변수의 값을 보여준다. P_t 는 WPTS 전력 송신기의 출력이고, G_t 는 송신 안테나 이득을 나타내며 $P_t \cdot G_t$ 의 값은 3W EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) 이다. WPTS 전력 송신기와 센서 노드 사이의 거리를 나타내는 R 이 증가할수록 수신 RF 신호 전력 (P_r)이 급격히 감소하며, 패치 안테나를 사용하면 다이폴 안테나 대비 대략 3배 정도 큰 수신 RF 신호 전력을 가지는 것을 알 수 있다.

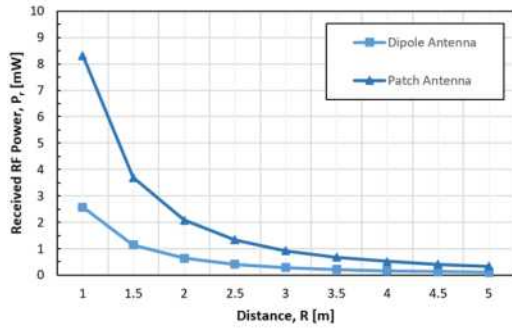


그림 2. WPTS 전력 송신기의 수신 RF 신호 전력
Fig. 2. Received RF signal power of WPTS receiver

표 1. Friis 방정식 변수
Table 1. Parameters of Friis equation

Parameter	Value
$P_t G_t$	3W
G_r	Dipole: 1.0dBi, Patch: 6.1dBi
λ	0.328m (f: 915MHz)

WPTS 전력 송신기와 센서 노드 사이의 거리가 3m 일 때 센서 노드의 WPTS 전력 수신기를 구성하는 패치 안테나로 수신한 RF 신호 전력은 0.9mW 이고, 다이폴 안테나로 수신한 RF 신호 전력은 0.3mW 이다. WPTS 전력 송신기와 센서 노드 사이의 거리가 5m로 증가하면 센서 노드의 WPTS 전력 수신기에 사용한 패치 안테나로 수신한 RF 신호 전력은 0.3mW 이고, 다이폴 안테나로 수신한 RF 신호 전력은 0.1mW 감소하게 된다.

RF-DC 변환기의 변환 효율이 65.7%인 경우, 변환된 DC 전력을 수치 해석한 결과는 표 2와 같다. WPTS 전력 송신기와 센서 노드 사이의 거리 R이 1m 인 경우, RF-DC 변환기의 입력인 수신한 RF 신호의 전력은 8.31mW 이고, 출력은 5.46mW 이다. R이 3m로 증가하면 수신한 RF 신호의 전력은 0.92mW, 변환된 DC 전력은 0.54mW로 감소하게 된다. 무선 링크 구간에서 RF 신호의 전송 손실로 인해서 WPTS의 무선 전력 전송 커버리지는 단거리로 제한된다는 것을 알 수 있다.

표 2. RF-DC 컨버터의 입력, 출력 전력
Table 2. Input and output power of RF-DC converter

R [m]	Input Power [mW]	Output Power [mW]
1.0	8.31	5.46
1.5	3.69	1.91
2.0	2.08	1.21
2.5	1.33	0.81
3.0	0.92	0.54
3.5	0.68	0.35
4.0	0.52	0.22
4.5	0.41	0.11
5.0	0.33	0.03

3. 누설 동축 케이블 활용 센서 네트워크 구축 방안

3.1 센서 네트워크 구성

센서 네트워크 및 WPTS 무선 전력 커버리지를 확대하기 위해서 센서 네트워크의 백본망으로 CATV 망을 활용하였다. 게이트웨이와 연결되는 싱크 노드는 WOC (WiFi over Coax)를 적용하여 CATV 망에 연결될 수 있다. WOC는 CATV 망의 구내 동축선로로 WiFi 신호를 분배하고 전달하는 DAS (Distributed Antenna System)를 구현하기 위한 기술이다[5]. 동축선로로 WiFi 신호를 전송하기 때문에 전송손실이 25dB 이하이며, 벽이나 장애물로 인한 신호 세기 감소와 다중 경로 페이딩 (multi-path fading)이 발생하지 않아서 구내 무선 커버리지를 확장할 수 있다.

CATV 망의 광중단장치인 ONU (Optical Network Unit)에서 신호를 분배하는 Tapoff 까지는 12C 또는 17C 동축 케이블이 사용된다. Tapoff 단에서 STB (Set-Top Box) 까지는 5C 또는 7C 동축 케이블이 설치된다. 맥내로 인입되는 구간에 사용되는 7C 동축케이블 상용 제품은 925MHz에서 0.134dB/m, 2.4GHz에서 0.223dB/m의 낮은 감쇄를 가진다[6]. 따라서 그림 3에서와 같이 싱크 노드를 WOC 기술을 적용하여 인입선 구간에 설치하고, 동축선로로 BLE 신호와 WPTS 전력 송신기 신호를 전송하면 무선 구간

에서 발생하는 신호 감쇄에 의한 센서 네트워크 구축 제약을 줄일 수 있다.

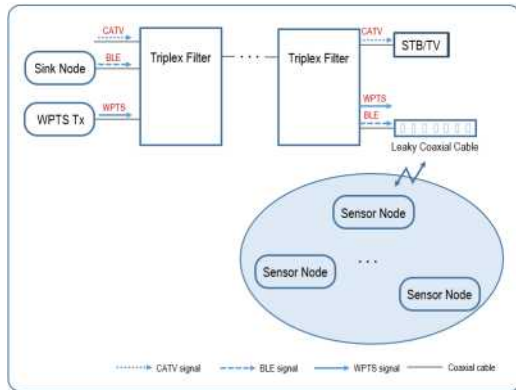


그림 3. WOC와 누설 동축 케이블 기반 센서 네트워크
Fig. 3. Sensor network based on WOC and leaky coaxial cable

그림 3에서처럼, 싱크 노드와 WPTS 전력 송신기는 혼합분리기 (triplex filter)를 이용하여 CATV 망에 연결된다. 혼합분리기는 CATV 신호 (상향: 5~42MHz 데이터, 하향: 54~750MHz 방송/인터넷/부가서비스), 싱크 노드의 BLE 신호, WPTS 전력 송신기 신호를 결합하고, 분리하기 위한 수동 소자이다. 센서 네트워크를 구축하는 지점에는 혼합분리기를 설치하고, BLE 신호만 통과할 수 있는 포트에 누설 동축 케이블을 연결하여 센서 노드와 통신을 하게 된다. 혼합분리기의 CATV 망 신호 포트에는 STB를 연결하여 기존 CATV 서비스를 제공하게 된다.

누설 동축 케이블은 외부도체에 일정한 간격으로 배치되는 슬롯 (Slot)을 가진다. 슬롯은 직사각형 모양의 구멍이며, 슬롯의 크기와 간격에 의해서 RF 특성이 결정된다[7]. 안테나 역할을 하는 누설 동축 케이블은 슬롯을 통해 신호 일부를 방사하게 되며, 동축 케이블의 원주방향으로 균일한 전파를 형성하게 된다. BLE 신호와 WPTS 전력 송신기 신호는 슬롯을 통해 방사되어 센서 노드에 전달된다. 누설 동축 케이블은 전파 도달이 원활하지 않고 안테나 방식으로 송수신이 불가능한 건물 지하, 터널 같은 곳에서 사각지대를 줄일 수 있어서 센서 설치 환경에 대한 제약을 줄일 수 있다.

3.2 센서 네트워크 커버리지 분석

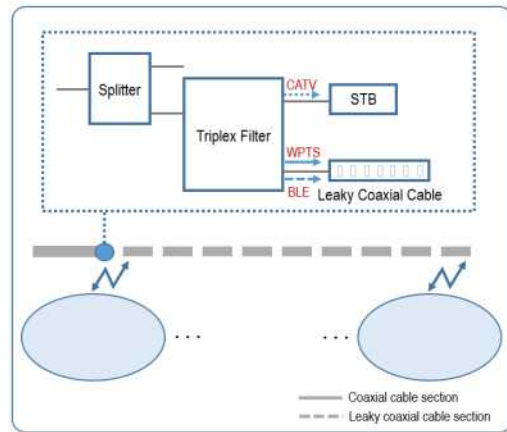


그림 4. 센서 네트워크의 커버리지 도식도
Fig. 4. Coverage diagram of sensor network

그림 4는 센서 네트워크의 커버리지를 보여준다. 유선 링크 구간에서 생기는 신호 손실로 인해서 BLE 신호가 감쇄되어도 센서 노드 최소 수신 신호 강도 지표 RSSI (Received Signal Strength Indicator)를 만족하는 영역이다. BLE 신호 출력은 10mW/㎒로 제한하고 있어서 2MHz 채널 대역폭 기준으로 20mW (13dBm)를 넘지 못한다. 그림 4에서와 같이 안테나를 대체하여 누설 동축 케이블을 사용하는 경우, 싱크 노드에서 누설 동축 케이블까지 발생하는 유선 링크 구간의 총손실 ($L_{t,wire}$)은 식 1과 같다. 유선 링크 구간의 총손실은 인입선으로 사용되는 동축 케이블에서 생기는 감쇄 (L_{coax}), 신호 분배기의 손실 ($L_{splitter}$), CATV/BLE/WPTS 전력 송신기 신호를 결합/분리하는 혼합분리기의 손실 ($L_{triplexer}$), 누설 동축 케이블의 감쇄 ($L_{att,leaky}$)로 구성된다. 식 2의 누설 동축 케이블에서 발생하는 신호 손실 $L_{t,leaky}$ 는 입력단에서 케이블의 길이 방향으로 신호가 전송되면서 생기는 감쇄 ($L_{att,leaky}$, dB/100m)와 슬롯을 통해 방사되는 신호에서 생기는 결합손실 (coupling loss(95%), dB) $L_{coupling,leaky}$ 로 구성된다. 결합손실은 누설 동축 케이블의 길이 방향에 수직으로 2m 떨어진 지점에서 안테나로 측정된 신호 손실의 양으로 나타낸다[8].

$$L_{t,wire} = L_{coax} + L_{splitter} + 2L_{triple} + L_{att,leaky} \quad (1)$$

$$L_{t,leaky} = L_{att,leaky} + L_{coupling,leaky} \quad (2)$$

싱크 노드의 출력은 누설 동축 케이블의 시작점에서 방사되는 신호(2.4GHz, BLE) 출력이 13 dBm 보다 작도록 설정되어야 된다. 그리고 센서 노드의 수신 신호 강도 지표가 허용되는 최소값인 -78dBm 보다 큰 구간까지 누설 동축 케이블을 사용할 수 있다.

$$RSSI = 13dBm - \frac{l_{leaky}}{100m} \times L_{att,leaky} - L_{coupling,leaky} \geq -78dBm \quad (3)$$

따라서 수신 신호 강도 지표를 계산하는 식 3에 의해서 2.4GHz 주파수 대역에서 감쇄 ($L_{att,leaky}$, dB/100m)가 27.93이고, 결합손실 ($L_{coupling,leaky}$, dB)이 60인 상용 제품의 경우, 사용할 수 있는 누설 동축 케이블의 길이 (l_{leaky})는 111m 정도이며, 해당 구간까지 센서 네트워크를 구축하여 커버리지를 확장할 수 있다[9].

WPTS 전력 송신기 신호 대역인 900MHz 대역에서는 9.4dB/100m의 감쇄와 63dB의 결합손실을 가진다. 따라서 누설 동축 케이블의 시작점에서 3W EIRP를 가지도록 전력 송신기 출력을 제어해야 한다. 센서 노드는 WPTS 전력 수신기의 축전 캐패시터에 흐르는 충전 전류가 센서 노드의 평균 소비 전류보다 커야 정상적으로 동작할 수 있다. 표 3은 BLE 비콘의 게시 주기에 따른 평균 소비 전류를 보여준다. 패킷의 데이터 크기(payload)는 27bytes이며, 게시 주기가 100ms 일 때 평균 소비 전류는 322.4μA이다. 게시 주기가 1000ms로 길어지게 되면 평균 소비 전류가 33.5μA로 대략 10배 감소하게 된다.

표 3. 센서 노드의 평균 소비 전류

Table 3. Average current consumption of sensor node

Advertising Interval [ms]	Average Current [μA]
100	322.4
200	161.9
300	108.4
400	81.7
500	65.6
600	54.9
700	47.3
800	41.6
900	37.1
1000	33.5

표 4는 WPTS 전력 수신기의 충전 전류를 보여준다. WPTS 전력 송신기와 센서 노드 사이의 거리(R)가 길어질수록 전력 수신기의 충전 전류가 급격히 감소하므로 센서 노드의 BLE 비콘 게시 주기를 늘려서 평균 소비 전류를 충전 전류 이하가 되도록 해야 한다. 예를 들어 WPTS 전력 송신기와 센서 노드 사이의 거리가 3m인 경우, 충전 전류가 180μA 이므로 대략 200ms 까지 게시 주기를 줄일 수 있다. 하지만 4m에서는 충전 전류가 72μA로 감소하여 허용할 수 있는 게시 주기는 대략 500ms로 증가하게 된다.

표 4. WPTS 전력 수신기의 충전 전류

Table 4. Charge current of WPTS power receiver

R [m]	Charge Current [μA]
1.0	1818
1.5	637
2.0	403
2.5	270
3.0	180
3.5	116
4.0	72
4.5	37
5.0	10

4. 결론

센서 노드의 배터리 문제를 해결하기 위해서 915MHz RF 신호를 이용하는 WPTS 전력 수신기를 이용하여 전원공급부를 설계하였다. 그리고 WOC 기술을 활용하여 CATV 망 신호, 싱크 노드의 BLE 신호, WPTS 전력 송신기 신호를 결합/분리하기 위한 혼합분리기를 CATV 망의 인입선 구간에 설치하고, 동축선으로 BLE 신호와 WPTS 전력 송신기 신호를 전송하는 센서 네트워크 구축 방안을 제안하였다. 무선 구간에서 생기는 신호 감쇄에 의한 센서 네트워크 구축 제약을 줄일 수 방안을 제안하였다. 센서 네트워크를 구성하는 지점에 혼합분리기를 설치하고, 혼합분리기의 BLE 신호만 통과하는 포트에 누설 동축 케이블을 연결하면 센서 노드의 수신 신호 강도 지표가 허용되는 최소값인 -78dBm 보다 큰 구간까지 누설 동축 케이블을 사용하여 센서 네트워크를 구축할 수 있다.

REFERENCES

- [1] H. D. Jang, "Study on the Design Method of the Energy Harvesting Smart Sensor for Implementing IoT Service", The Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology, vol. 11, no. 1, pp. 89-94, Feb. 2018.
- [2] H. D. Jang, "Study on Design Method of RF Energy Harvesting WPTS Receiver", J. KICS, vol. 45, no. 2, pp. 364-367, Feb. 2020.
- [3] Bluetooth, Retrieved Oct. 10, 2021, from <http://www.beaconi.co.kr>.
- [4] Joseph A. Shaw, "Radiometry and the Friis transmission equation", Am. J. Phys., vol. 81, no. 1, pp. 33-37, Jan. 2013.
- [5] E. Biton, D. Sade, D. Shklarsky, M. Zussman, and G. Zussman, "Challenge: CeTV and Ca-Fi - Cellular and Wi-Fi over CATV", MobiCom'05, Cologne, Germany, Aug. 28-Sep. 2, 2005.
- [6] RFS, LCF14-50JFN product datasheet, Retrieved Oct. 14, 2021, from <http://www.rfsworld.com>.
- [7] Y. I. Hong, H. S. Nam, and J. K. Kim, "A

study on the electromagnetic wave properties of leaky coaxial cable using finite difference-time domain algorithm", Proc. Symp. KICS, vol. 18, no. 1, pp. 156-159, Jan. 1995.

- [8] RFS, RADIAFLEX® the Optimal confined-coverage solution brochure, Retrieved Oct. 25, 2021, from <http://www.rfsworld.com>.
- [9] RFS, RLKU12 product datasheet, Retrieved Nov. 8, 2021, from <http://www.rfsworld.com>.

저자약력

장 호 덕 (Ho-Deok Jang)

[정회원]



- 2002년 2월: 고려대학교 전파공학과 전파공학 (공학 석사)
- 2006년 8월: 고려대학교 전파공학과 초고주파및광파공학 (공학 박사)
- 2006년 9월 ~ 2014년 9월: LS 전선
- 2015년 4월 ~ 2016년 2월: 한국디지털케이블연구원
- 2016년 3월 ~ 현재: 동양미래대학교 정보통신공학과 교수

〈관심분야〉 스마트센서, IoT, 에너지 하베스팅