

무선 센서 네트워크의 전력 및 대역폭 효율적 M-1-1 프로토콜 설계

황윤경, 공형윤

울산대학교 전기전자정보시스템공학과

e-mail :pipilullu@mail.ulsan.ac.kr, hkong@mail.ulsan.ac.kr

Design of Power and Bandwidth Efficient M-1-1 Protocol in Wireless Sensor Networks

Yun-Kyeong Hwang, Hyung-Yun Kong

Dept. of Electrical Engineering, University of Ulsan

요 약

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 M 개의 센서 노드가 다른 센서 노드의 도움을 받아 최종 수신 노드로 전송하는 M-1-1 프로토콜을 제안한다. M 개의 센서 노드에 직교성을 가지는 주파수를 할당함으로써 최종 수신 노드로 데이터를 동시 전송하는 것이 가능하다. 센서 노드들 간의 협력통신을 통해서 무선 환경에서 겪는 페이딩현상을 극복하고, 직교성을 가진 반송파로 주파수 사용의 효율성을 높이고 인접한 센서 노드 신호로부터 오는 간섭을 제거할 수 있다.

1. 서론

무선 센서 노드는 현재의 배터리 기술의 한계로 인해 에너지 사용에 대단히 제약을 받고 있다[1]. 또한 무선 센서 네트워크에는 무선이라는 자체의 특성상 다중경로, 전파 감쇠, 잡음 및 간섭 등의 다양한 페이딩 현상이 존재한다[2]. 특히 수많은 노드들의 구성으로 이루어진 네트워크에서 다중 경로와 서로 다른 신호들의 영향으로 심각한 신호 왜곡을 초래하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 부호화 기술 및 다이버시티 기술이 많이 연구되고 있다.

MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템은 동일한 데이터를 다중의 안테나를 통해 전송함으로써 송신 다이버시티 효과를 획득한다. 안테나의 수만큼 다양한 경로를 통해 수신되는 중복 데이터를 MRC(Maximum Ratio Combining)을 거쳐 원신호로 복구한다. 하지만 MIMO 시스템은 다수의 안테나를 설치해야 하고 송수신 전력의 소비가 높다는 단점을 가지고 있다. 센서 노드는 작은 크기, 저전력 소모가 바탕이 되어야 함으로 페이딩을 극복하기 위하여 MIMO 시스템의 설치가 어렵다[3].

협력통신 프로토콜은 단일 안테나를 가진 센서 노드가 이웃 노드와의 협력을 통해 가상의 다이버시티

효과를 획득한다[3]-[7]. 따라서 MIMO의 다이버시티 효과와 유사한 성능을 획득하고, MIMO 시스템이 가지는 제약점을 극복하여 무선 센서 네트워크에서 페이딩 현상을 극복하기 위한 프로토콜로 사용이 적합하다.

협력 통신의 세가지 기본적인 프로토콜 방식으로는 증폭 후 전송(Amplify and Forward), 복호 후 전송(Decode and Forward)과 복호 후 재부호화(Decode and Reencode) 방식이 있다. 증폭 후 전송은 수신단에서 센서 노드와 파트너 노드 사이의 채널정보(CSI: Channel State Information)를 알아야 하는데 그것이 어렵고, 노이즈도 함께 증폭되어 BER 성능이 가장 나쁘다. 복호 후 재 부호화 방식은 길쌈부호(Convolutional Code), 터보 부호(Turbo Code), TCM(Trellis Coded Modulation) 등을 사용하여 세가지 방식 중에서 가장 성능이 좋지만, 시스템구현의 복잡성이 높아 센서에 적용하기 힘들다[3]-[10].

본 논문에서는 성능 및 복잡도를 고려해 복호 후 전송방식을 선택하여 무선 센서 네트워크에 적용한다. 또한 센서 노드에 직교성을 가진 반송파를 부여하여 여러 개의 센서 노드에서 동일 파트너로 동시에 데이터를 전송한다. 이를 통해 주파수 효율을 높이고 인접 노드 신호로부터의 간섭을 제거한다.

2. 제안하는 M-1-1 협력 통신 프로토콜

2-1. 기존의 복호 후 전송 방식

기존의 복호 후 전송방식을 설명함에 앞서 수신단에서는 모든 경로의 채널정보를 알고 있다고 가정하며 모든 송수신기는 정확한 시간에 반송파의 동기화를 수행한다. 수식의 표현에서 S는 센서 노드, R은 파트너 노드, D는 최종 수신 노드이다. 기존의 복호 후 전송방식은 2 단계로 구성되어 있다. 1 단계에서, 센서 노드는 BPSK 로 변조된 신호 a 를 방송방식으로 전송한다. 중계기와 최종수신 노드에서 각각 그 신호를 받는다.

$$y_{SR} = \alpha_{SR} \sqrt{P_S} a + n_{SR} \tag{1}$$

$$y_{SD} = \alpha_{SD} \sqrt{P_S} a + n_{SD} \tag{2}$$

여기서 y_{ij} 는 노드 i 에서 보내고 노드 j 에서 받은 신호이다. n_{sj} 는 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 이고, α_{ij} 는 노드 i 와 j 사이의 경로 이득이다. P_S 는 센서 노드의 평균 전력이다. 중계기에서는 ML(Maximum Likelihood) 판정기에 의해서 원래의 신호를 복구한다.

$$\hat{a} = \text{sign}(\text{Re}(\alpha_{SR}^* y_{SR})) \tag{3}$$

여기서 $\text{sign}(\cdot)$ 는 (\cdot) 의 실수 부분에 대한 시그넘 함수이다.

2 단계에서는 중계기는 신호 \hat{a} 를 최종수신 노드로 보내고 최종수신 노드에서 받은 신호는 다음과 같다.

$$y_{RD} = \alpha_{RD} \sqrt{P_R} \hat{a} + n_{RD} \tag{4}$$

여기서 P_R 중계기의 전송 전력이고, n_{RD} 는 최종수신 노드의 AWGN 요소이다.

최종수신 노드에서는 두 단계 동안 전송된 신호 a 를 MRC (Maximal Ratio Combining)를 통해서 되찾는다[8].

$$\bar{a} = \text{sign}(\text{Re}(\alpha_{SD}^* y_{SD} + \alpha_{RD}^* y_{RD})) \tag{5}$$

직접 전송 프로토콜과 동등한 비교를 위하여 복호 후 전송 프로토콜의 전체 전력 P_T 은 직접 전송 프로토콜과 같다. 따라서 센서 노드와 중계기의 평균 전력은 $P_S = P_R = P_T/2$ 이다.

위의 식(2)와 식(4)를 대입하여 식(5)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{a} = \text{sign}(\sqrt{P_S}(|\alpha_{SD}|^2 a + |\alpha_{RD}|^2 \hat{a}) + n) \tag{6}$$

여기서 $n = \text{Re}(\alpha_{SD}^* n_{SD} + \alpha_{RD}^* n_{RD})$ 은 '0' 평균 가우시안 잡음의 랜덤 변수이다. n_{SD} 와 n_{RD} 는 독립적이기 때문에 잡음의 분산은 다음과 같이 나타낸다.

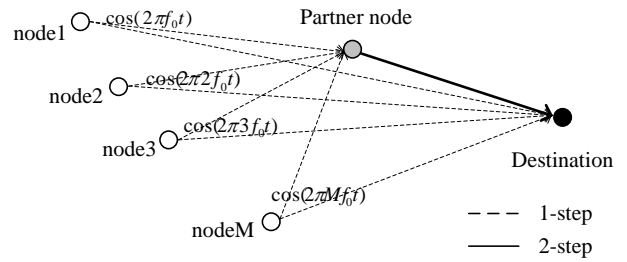
$$\text{Var}(n) = \frac{|\alpha_{SD}|^2 + |\alpha_{RD}|^2}{2} \tag{7}$$

2-2. M-1-1 협력 프로토콜

크기와 전력이 제한된 센서 네트워크에 협력통신 프로토콜을 제안한다. 협력통신 프로토콜은 파트너 노드의 협조를 통해 전송 다이버시티 효과를 획득하여 저전력의 신뢰성 있는 데이터를 전송한다. 기존의 복호 후 전송 방식에서는 한 노드에서 데이터를 전송할 경우 하나의 파트너를 결정한다. 제안하는 알고리즘은

센서 노드에 직교성을 가진 반송파를 부여하여 동시에 여러 개의 노드들이 하나의 파트너를 가지고 협력적 통신을 하게한다. 따라서 주파수 사용의 효율을 높이고 인접한 센서 노드 신호간의 간섭을 제거한다.

M-1-1 협력 프로토콜은 M 개의 센서 노드, 1 개의 파트너 노드, 1 개의 수신노드로 구성한다. 1 단계에서는 M 개의 센서 노드는 고유의 반송파를 가지고 파트너 노드와 수신 노드로 동시에 데이터를 전송한다.



(그림 1) M-1-1 협력 통신 프로토콜

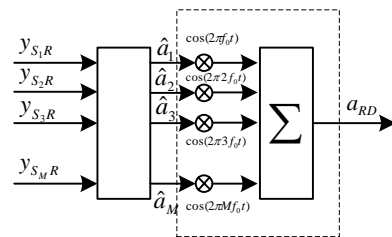
파트너 노드와 수신 노드에서 받은 신호는 다음과 같다.

$$\sum_{m=1}^M y_{SmR} = \sum_{m=1}^M \alpha_{S_mR} \sqrt{P_{S_m}} a_m + \sum_{m=1}^M n_{S_mR} \tag{8}$$

$$\sum_{m=1}^M y_{SmD} = \sum_{m=1}^M \alpha_{S_mD} \sqrt{P_{S_m}} a_m + \sum_{m=1}^M n_{S_mD} \tag{9}$$

여기서 a_m 은 M 번째 센서 노드 신호 S_m 를 BPSK 변조한 것이며, P_{S_m} 은 M 번째 센서 노드의 평균 전력이다.

2 단계에서 파트너 노드는 원신호를 복호하고 복조 후 재전송한다. 파트너 노드의 시스템은 다음 그림. 2 와 같다.



(그림 2) 파트너 노드의 내부 시스템 블록도

\hat{a}_m 은 파트너 노드에서 M 개의 센서 노드로부터 오는 신호를 복호한 것이다.

$$\sum_{m=1}^M \hat{a}_m = \sum_{m=1}^M \text{sign}(\text{Re}(\alpha_{S_mR}^* y_{S_mR})) \tag{10}$$

복호 후, $(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \dots, \hat{a}_M)$ 은 직교한 주파수를 곱하는 IFFT 과정을 거치고 다시 최종수신 노드로 전송된다. 최종수신 노드에서 받은 신호는 다음과 같다.

$$y_{RD} = \alpha_{RD} \sqrt{P_R} a_{RD} + n_{RD} \tag{11}$$

다른 통신 프로토콜과 동등한 전력을 사용하기 위하여 아래의 식의 조건을 만족한다.

$$P_R = P_{S_m} = P_T / M = P_S \tag{12}$$

최종수신 노드는 센서 노드와 파트너 노드의 신호를 수신하여 MRC를 통해 원신호를 복구한다.

$$\sum_{m=1}^M \bar{a}_m = \sum_{m=1}^M \text{sign}(\text{Re}(\alpha_{S_m D}^* y_{S_m D} + \alpha_{RD}^* y_{RD})) \quad (13)$$

식(9), 식(15), 식(16)을 정리하면 다음과 같다.

$$\sum_{m=1}^M \bar{a}_m = \sum_{m=1}^M \text{sign}(\sqrt{P_S}(|\alpha_{S_m D}|^2 a_m + |\alpha_{RD}|^2 \hat{a}_m) + n_m) \quad (14)$$

여기서 n_m 은 다음과 같다.

$$\sum_{m=1}^M n_m = \sum_{m=1}^M \text{Re}(\alpha_{S_m D}^* n_{S_m D} + \alpha_{RD}^* n_{RD}) \quad (15)$$

n_m 은 아래와 같은 분산 값을 가지는 '0' 평균 가우시안 잡음이다

$$\text{Var}(n_m) = \frac{|\alpha_{S_m D}|^2 + |\alpha_{RD}|^2}{2} \quad (16)$$

센서 노드, 파트너 노드, 최종 수신 노드 사이의 경로이득을 취하기 때문에 센서 노드에서 최종 수신 노드로 데이터를 전송하기 위해 사용하는 전력이 감소한다.

3. 시뮬레이션 결과

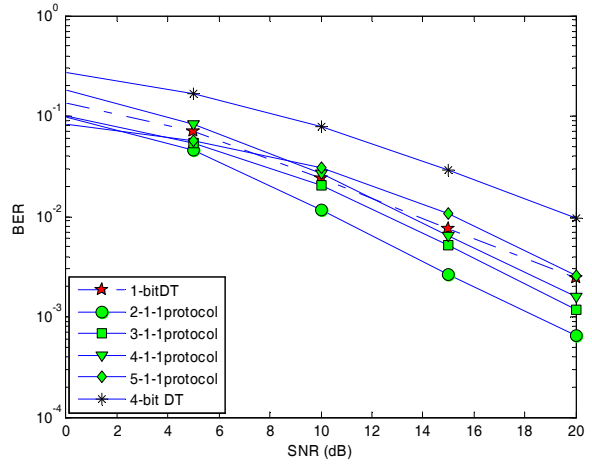
센서 노드, 파트너 노드, 최종 수신 노드 사이의 채널이 모두 독립적이며, fast-flat 레일리 페이딩 채널과 AWGN 채널이 더해진 환경에서 성능을 검증하였다. 센서 노드와 최종 수신 노드 사이의 거리를 'I'로 정하고 파트너 노드가 그 사이에 위치한다. 경로이득은 다음의 식으로 결정한다.

$$\lambda_{ij} = (d_{SD} / d_{ij})^\beta \quad (17)$$

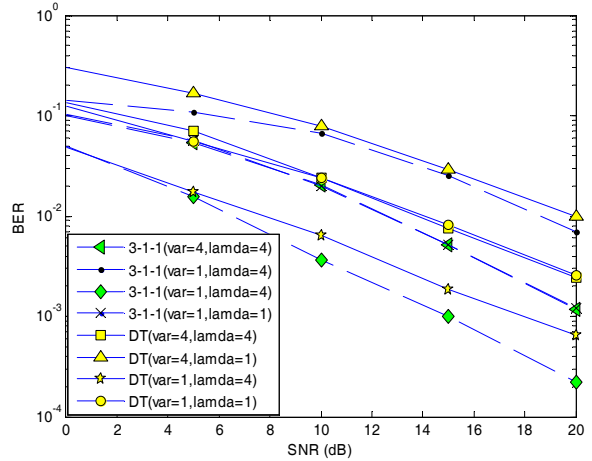
여기서 d_{ij} 는 수신 노드 i 과 수신 노드 j 의 거리이고, β 는 경로이득 지수이다. 본 시뮬레이션에서 $\beta = 3$ 이다. 다음 그림. 3은 M-1-1 협력 통신 프로토콜의 M의 개수에 따른 결과이다. M=[2,3,4,5]인 경우이고 1-bit 직접 전송 방식과 4-bit 직접 전송 방식을 비교하였다. M=2인 경우 직접 전송과 비교하여 4dB 이상 성능이 향상 되었으며, 기존의 복호 후 전송 방식과 성능은 동일하지만 밴드폭 효율이 향상되었다.

그림. 4는 채널 환경에 따른 성능 분석을 나타내었다. 센서 네트워크 환경에서는 많은 노드가 근거리 배치되어 있기 때문에 인접 노드 간의 신호 간섭이 발생하여 데이터 전송에 잡음 요소로 영향을 끼칠 것이다. 페이딩 채널과 AWGN 채널의 분산 값을 다르게 주어 채널 상황을 변화 시켜보았다.

M의 개수에 따른 성능 분석에서 직접 전송과 가장 비슷한 성능을 보인 3-1-1 프로토콜을 대표로 비교 하였으며, 4 가지 채널 상황에서 위와 같은 결과가 나왔다. 채널 상황이 가장 좋지 않은 (var=4, lamda=1) 경우, 10dB 전에서 성능의 차이를 가장 많이 보였다.



(그림 3) M에 따른 제안 프로토콜 성능 분석



(그림 4) 채널 환경에 따른 제안 프로토콜 성능 분석

4. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 다양한 페이딩 현상을 극복하기 위한 프로토콜을 제안하였다. 센서들 간의 협력적 통신으로 다이버시티 효과를 획득하고 M-1-1 프로토콜은 동시에 다수의 데이터 전송을 가능하게 하였다. 따라서 전송 전력의 소비를 감소시키고, 주파수 사용의 효율을 증가 시켰다. 동시에 각 센서 노드에 직교성을 가진 반송파를 사용하여 인접한 노드로부터 오는 간섭신호를 제거할 수 있었다. 본 연구는 사용 전력이 제한된 무선 센서 네트워크에 필수적이다.

Acknowledgement

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었습니다.

이 연구에 참여한 연구자는 「2 단계 BK21 사업」의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks", IEEE Communications Magazine, Vol. 40, Issue 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [2] E. Shih *et al.*, "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks", Proc. ACM MobiCom '01, pp. 272-86, Rome, Italy, July 2001.
- [3] A. Nosratinia, A. Hedayat, and T. E. Hunter, "Cooperative Communication in Wireless Networks", IEEE Communications Magazine, Vol. 42, Issue 10, pp. 74-80, Oct. 2004.
- [4] E. Zimmermann, P. Herhold, and G. Fettweis, "On the Performance of Cooperative Relaying in Wireless Networks", European Trans. on Telecommunications, Vol. 16, No. 1, Jan-Feb 2005.
- [5] J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and G.W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior", IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 50, Issue 12, pp. 3062 – 3080, Dec. 2004.
- [6] E.G. Larsson and Y. Cao, "Collaborative transmit diversity with adaptive radio resource and power allocation", Communications Letters, IEEE, Vol. 9, Issue 6, pp. 511-513, June 2005.
- [7] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity. Part I-II", IEEE Trans on Communications, Vol. 51, Issue 11, pp. 1927-1948, Nov. 2003.
- [7] X. Li, "Energy efficient wireless sensor networks with transmission diversity", Electronics Letters, Vol. 39, Issue 24, pp. 1753-1755, 27 Nov. 2003.
- [8] H. Ochiai, P. Mitran, and V. Tarokh, "Design and analysis of collaborative diversity protocols for wireless sensor networks", VTC2004-Fall, Vol. 7, pp. 4645-4649, 26-29 Sept. 2004.
- [9] Alamouti, Siavash M., "A simple transmit diversity technique for wireless communications", IEEE Selected Areas in Communications, Vol. 16, Issue 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998