

무선수감부망에서 협동분집에 대한 이론적인 해석의 한가지 방법

김래국, 최은경

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《채신부문에서는 이동통신망을 현대적으로 완비하고 그 능력을 훨씬 높이며 다음세대 이동통신을 받아들이기 위한 대책을 세워야 합니다.》

무선수감부망(WSN: Wireless Sensor Network)은 여러 과학분야와 연관되어있고 고도로 집적화되어있다. 무선수감부망을 이루는 수감마디들은 그 기능이 제한된것으로 하여 대체로 전력조종을 진행하지 못하고 전송전력이 같다고 가정한다.[1-6]

선행연구[1]에서는 최소도약경로화(MHR: Min-Hop Routing)를 진행하고 WSN에서 협동분집의 성능을 분석하였다. 그러나 구체적인 전송방식을 명백히 해명하지 못하였으며 더우기 협동분집의 성능을 에네르기소비와 파के트도달개수에 의해서만 평가하였다.

론문에서는 전력조종을 진행하지 않는 경우 파케트전송실패를 고려할 때 WSN에서 협동분집의 구체적인 전송방식과 이 방법의 이론적인 성능을 에네르기소비, 파케트도착확률 등 여러 측면에서 해석하였다.

1. 체 계 모 형

협동분집방법의 전송모형은 그림 1과 같다.

협동분집방법의 구체적인 전송방식은 다음과 같다.

원천마디 S 는 자료파케트전송시간 T_{tx} 동안 한도약이웃거리에 있는 목적마디 D 에로 직접 자료파케트를 보내는 동시에 중계마디 M 을 통하여 D 로 보낸다. 즉 자료파케트는 한도약통신과 두 도약통신을 결합하여 한도약이웃마디에로 전송된다.

자료파케트전송성공확률을 η (일반적으로 0.7)라고 하면 중계마디 M 은 T_{tx} 시간 동안 확률 η 로 자료파케트를 수신하여 목적마디 D 로 재전송한다.

또한 $1-\eta$ 의 확률로 T_{tx} 시간동안 대기-듣기상태에 있을수도 있다. 이때에는 자료파케트를 받지 못하므로 D 에로의 자료파케트전송을 하지 않는다.

한도약지연시간이 T_{Hop} 라면 목적마디 D 는 η 의 확률로 T_{tx} 시간동안 원천마디 S 로부터의 자료파케트수신을 진행하거나 $1-\eta$ 의 확률로 T_{tx} 시간동안 대기-듣기상태에 있게 된다.

다음 T_{Hop} 시간동안 대기한 후 η^2 의 확률로 중계마디 M 으로부터의 자료파케트전송을

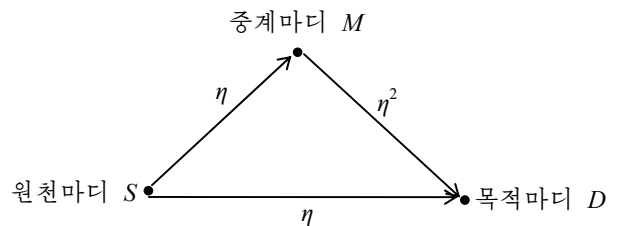


그림 1. 협동분집방법의 전송모형

수신하는가 $1 - \eta^2$ 의 확률로 대기-대기상태에 있게 된다. ($S \rightarrow D$ 사이의 전송확률이 η , $M \rightarrow D$ 사이의 전송확률이 η 이므로 $S \rightarrow M \rightarrow D$ 사이의 전송확률은 η^2)

우와 같은 시간에 따르는 전송방식을 서술하면서 편리상 활성-활성상태이행시간을 무시하였다.

2. 다중경로를 리용하는 협동분집방법의 이론적인 해석

1) 협동분집이 있을 때의 성능분석

WSN의 다중경로를 리용하는 협동분집에서 마디와 마디사이에 자료파케트를 전송하는데 필요한 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{total}^{div} &= E_S^{div} + E_M^{div} + E_D^{div} = \\ &= P_{tx} \cdot T_{tx} \cdot (1 - \eta) + P_{rcv} \cdot T_{tx} \cdot (2\eta + \eta^2) + P_{lst} \cdot T_{tx} \cdot 2(1 - \eta)(1 - \eta^2) + P_{lst} \cdot T_{Hop} \end{aligned} \quad (1)$$

거의 모든 WSN수감마디들에서 $P_{rcv} = P_{lst}$, 중계마디 M 에서의 자료파케트전송에너지를 고려하면 식 (1)을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$E_{total}^{div} = P_{tx} \cdot T_{tx} \cdot (1 + \eta) + 3P_{rcv} \cdot T_{tx} + 2P_{rcv} \cdot T_{Hop} \quad (2)$$

파케트전송성공확률은 다음과 같다.

먼저 1개의 파케트가 도착할 확률을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{packet}^{div}(1) &= (S에서 직접 D에로 파케트가 도착할 확률) \times \\ &\quad \times (M으로부터 파케트를 수신받지 못할 확률) + \\ &\quad + (S에서 파케트전송이 실패할 확률) \times \\ &\quad \times (M으로부터 파케트를 수신할 확률) = \\ &= \eta(1 - \eta^2) + (1 - \eta)\eta^2 = \eta - \eta^3 + \eta^2 - \eta^3 = \eta + \eta^2 - 2\eta^3 \end{aligned} \quad (3)$$

다음 2개의 파케트가 도착할 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{packet}^{div}(2) &= (S에서 직접 D에로 파케트가 도착할 확률) \times \\ &\quad \times (M으로부터 파케트를 수신할 확률) = \eta \cdot \eta^2 = \eta^3 \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 1개의 파케트가 성공적으로 전송될 확률은 다음과 같다.

$$P_{packet}^{div} = P_{packet}^{div}(1) + P_{packet}^{div}(2) = \eta + \eta^2 - 2\eta^3 + \eta^3 = \eta + \eta^2 - \eta^3 \quad (5)$$

파케트전송 및 수신에 소모되는 시간은 다음과 같다.

$$T_{packet}^{div} = T_{tx} + T_{Hop} + T_{tx} = 2T_{tx} + T_{Hop} \quad (6)$$

2) 협동분집이 없을 때의 성능분석

이제 다중경로에 기초한 협동분집이 없을 때 WSN에서의 에너지소비 및 파케트전송성공확률, 소모시간을 분석해보자.

파케트전송실패를 고려한 WSN에서는 원천마디 S 에서의 자료파케트송신이 없으면 목적마디 D 에서 S 에로의 재전송요구조종통보문을 보내어 S 에서 파케트를 재전송한다. 이때 지나친 재전송요구는 에너지소비를 증가시켜 동기화를 파괴시킬수 있기때문에 보통 한번만 재전송요구통보문을 보낸다. 다시말하여 원천마디 S 는 T_{tx} 동안 자료파케트를 보낸 다음

한 도약지연시간 T_{Hop} 만큼 대기한다. 목적마디 D 는 T_{tx} 동안 η 의 확률로 자료파κέ트를 수신하며 이때 S 으로 재전송통보문을 보내지 않는다. 목적마디 D 가 T_{tx} 동안 확률 $(1-\eta)$ 로 자료파κέ트를 수신하지 못하면 재전송요구통보문을 S 으로 보낸다. 그러면 이 통보문이 $\eta(1-\eta)$ 의 확률로 목적마디 D 에 도착한다. 원천마디 S 는 T_{Hop} 동안 대기한 이후 αT_{tx} 동안 확률 $(1-\eta)$ 로 재전송요구통보문을 수신하든가 혹은 확률 $(1-\eta)^2$ 로 듣기상태에 있게 된다.

만일 재전송요구통보문을 수신하였다면 T_{tx} 동안 자료파κέ트를 다시 목적마디 D 로 전송하며 이 통보문도 $\eta^2(1-\eta)$ 의 확률로 목적마디 D 에 도착한다. 원천마디 S 으로 재전송요구통보문을 보낸 후 T_{Hop} 만큼 대기상태에 있던 목적마디 D 는 $\eta^2(1-\eta)$ 의 확률로 재전송된 자료파κέ트를 수신하든가 아니면 $\eta(1-\eta)^2$ 의 확률로 받지 못하여 듣기상태에 있게 된다.

이때 전체 시간소모는 다음과 같다.

$$T_{packet} = T_{tx} + T_{Hop} + \alpha T_{tx} + T_{Hop} + T_{tx} = (2 + \alpha)T_{tx} + 2T_{Hop} \quad (7)$$

여기서 $\alpha < 1$ 은 자료파κέ트의 길이를 1이라고 할 때 조종통보문의 길이로서 $1/3 \sim 1/5$ 범위에 있다.

대다수의 경우 $P_{rcv} = P_{lst}$ 임을 고려하여 원천마디 S 가 소비하는 에네르기와 목적마디 D 가 소비하는 에네르기는 다음과 같다.

$$E_S = P_{tx} \cdot T_{tx} (1 - \eta(1 - \eta)) + P_{rcv} \cdot T_{Hop} (1 + \eta(1 - \eta)) + P_{rcv} \cdot T_{tx} \cdot \alpha \quad (8)$$

$$E_D = P_{rcv} \cdot T_{tx} \cdot (2 - \eta) + 2P_{rcv} \cdot T_{Hop} \cdot (1 - \eta) + P_{tx} \cdot T_{tx} \cdot \alpha \cdot (1 - \eta) \quad (9)$$

협동분집이 없을 때 마디와 마디사이로 자료파κέ트 1개를 보내는데 소비되는 전체 에네르기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_S + E_D = \\ &= P_{tx} \cdot T_{tx} \cdot (1 + \eta - \eta^2 + \alpha(1 - \eta)) + P_{rcv} \cdot T_{Hop} (3 - \eta - \eta^2) + \\ &\quad + P_{rcv} \cdot T_{tx} (2 - \eta + \alpha) \end{aligned} \quad (10)$$

자료파κέ트가 성공적으로 전송될 확률은 다음과 같다.

$$P_{packet} = \eta + (1 - \eta) \cdot \eta \cdot \eta = \eta + \eta^2(1 - \eta) = \eta + \eta^2 - \eta^3 \quad (11)$$

3) 협동분집이 있을 때와 없을 때의 성능비교

먼저 에네르기소비성능을 비교해보면 두 경우 에네르기소비차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_{total} - E_{total}^{div} &= P_{rcv} \cdot T_{Hop} (2 - \eta - \eta^2) - P_{tx} \cdot T_{tx} (\eta^2 - \alpha(1 - \eta)) - \\ &\quad - P_{rcv} \cdot T_{tx} (\alpha - 1 - \eta) \end{aligned} \quad (12)$$

그리고 자료파κέ트전송성공확률은 $P_{packet}^{div} = P_{packet} = \eta + \eta^2 - \eta^3$ 으로서 같다. 그러나 협동분집인 경우 $P_{packet}^{div}(2) = \eta^3$ 의 확률로 두 파κέ트가 모두 목적마디 D 에 도착한다는데 대하여 류의하여야 한다.

공간분집을 리용할 때 합성신호의 SNR가 매 분집신호의 SNR들의 합과 같다는것은 잘 알려져있다. 합성신호의 SNR는 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2)^2 |s_1|^2}{|h_1|^2 \sigma_n^2 + |h_2|^2 \sigma_n^2} = \frac{(|h_1|^2 + |h_2|^2) |s_1|^2}{\sigma_n^2} = \Gamma_1 + \Gamma_2 \quad (13)$$

일반적으로 k 개의 다중경로가 있을 때 합성신호의 SNR는 다음과 같다.

$$\Gamma = \sum_{i=1}^k \Gamma_i \quad (14)$$

그림 1에서 보여준바와 같이 $S \rightarrow D$ 경로보다 $M \rightarrow D$ 경로가 보다 짧으며 따라서 SNR도 역시 크다고 볼수 있다. 이것은 WSN의 대표적인 위상망인 그물형과 셀형에서 보면 명백히 알수 있다. 그물형에서는 $M \rightarrow D$ 경로가 $S \rightarrow D$ 경로의 $1/\sqrt{2}$ 이고 셀형에서는 두 경로가 같다. 두 경로가 같다고 보아도 평균SNR는 2배로 커진다는것을 알수 있다.

L^2 -QAM별자리에서 SNR에 따르는 오류확률은 다음과 같다.[2]

$$P_b(\Gamma) = 2 \frac{L-1}{L \log_2 L} Q\left(\sqrt{\frac{3\Gamma}{L^2-1}}\right) \quad (15)$$

결국 협동분집이 없을 때 식 (15)로 표현되는 오류확률을 협동분집에 리용한다면 다음과 같이 쓸수 있다.

$$P_b^{div}(\Gamma) = \frac{2}{\eta + \eta^2 - \eta^3} \cdot \frac{L-1}{L \log_2 L} \cdot \left[(\eta + \eta^2 - 2\eta^3) Q\left(\sqrt{\frac{3\Gamma}{L^2-1}}\right) + \eta^3 Q\left(\sqrt{\frac{6\Gamma}{L^2-1}}\right) \right] \quad (16)$$

$$\Delta P_b(\Gamma) = P_b(\Gamma) - P_b^{div}(\Gamma) = \frac{\eta^3}{\eta + \eta^2 - \eta^3} \cdot \frac{L-1}{L \log_2 L} \cdot \left[Q\left(\sqrt{\frac{3\Gamma}{L^2-1}}\right) - Q\left(\sqrt{\frac{6\Gamma}{L^2-1}}\right) \right] \quad (17)$$

결국 오류확률은 식 (17)만큼 줄어든다. 이것은 오류확률이 일정한 조건에서 전송전력을 줄일수 있다는것을 의미하기도 한다. 전송전력의 감소는 곧 에네르기소비의 감소이며 망수명이 그만큼 늘어나게 된다.

한편 마디와 마디사이의 자료패케트전송에 소모되는 시간은 분집이 있을 때와 없을 때 각각 다음과 같이 된다.

$$T_{packet}^{div} = 2T_{tx} + T_{Hop} \quad (18)$$

$$T_{packet} = (2 + \alpha)T_{tx} + 2T_{Hop} \quad (19)$$

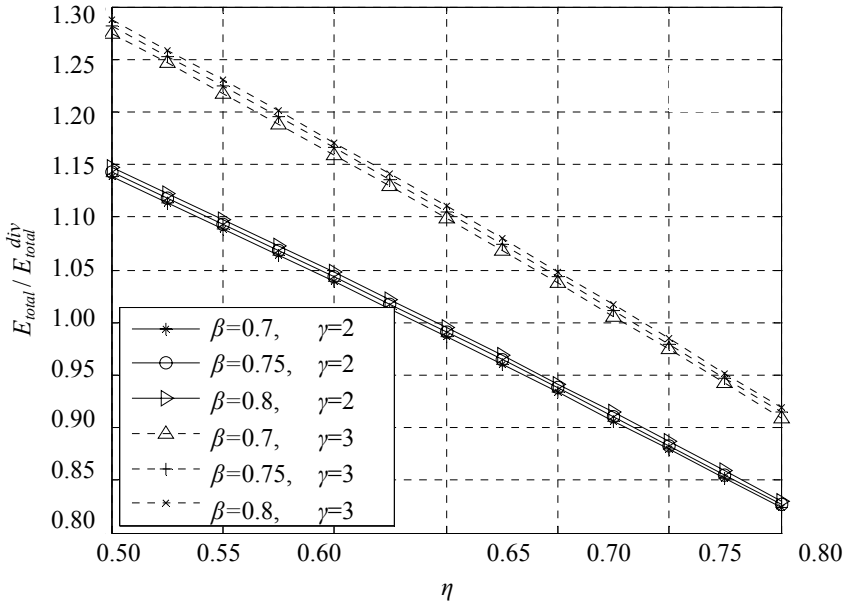
따라서 $T_{Hop}/T_{tx} = 2 \sim 3$ 임을 고려하면 T_{packet}^{div} 가 T_{packet} 의 $2/3 \sim 5/8$ 배 정도에 불과하다. 이것은 분집을 리용할 때 일정작성공간문제가 완화되며 또한 구간이 크지 않으므로 이에 따르는 추가적인 에네르기가 적다는것을 의미한다.

3. 모 의 결 과

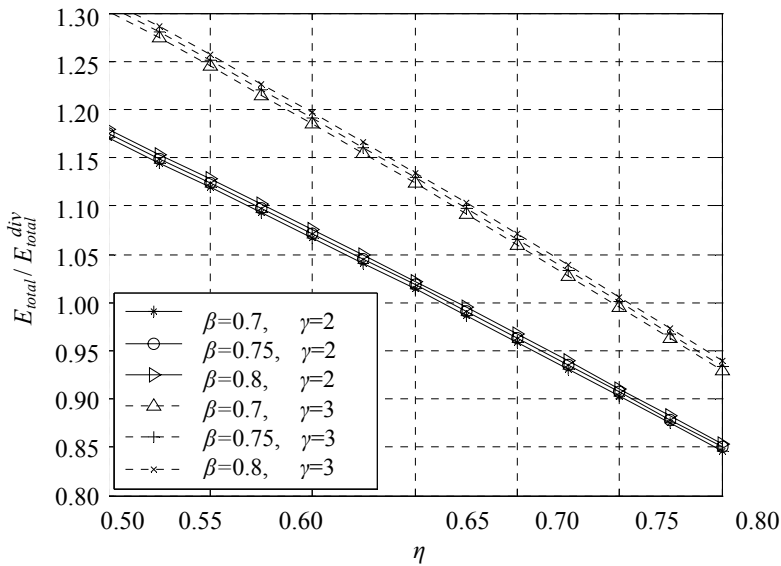
그림 2의 ㄱ)에서는 $\beta = P_{rx}/P_{tx}$ 가 각각 0.7, 0.75, 0.8이고 $\gamma = T_{Hop}/T_{tx}$ 가 각각 2, 3이며 $\alpha = 1/5$ 일 때 파케트전송확률에 따르는 분집이 있는 경우와 없는 경우의 에네르기비를 보여준다. 그림에서 보는바와 같이 파케트전송성공확률이 0.7이라고 할 때 $\gamma = 2$ 인 경우에는 협동분집을 리용하면 리용하지 않는 경우에 비하여 에네르기소비가 더 많지만 $\gamma = 3$ 인 경우 협동분집을 리용하면 에네르기소비가 더 작아진다는것을 알수 있다. 그리고 두 경우에 β 가 클수록 즉 수신신호전력이 송신신호전력에 가깝게 다가갈수록 협동분집을 리용하는 경우 리용하지 않는 경우에 비하여 에네르기소비가 전반적으로 약간 작아진다는것을 알수 있다.

그림 2의 ㄴ)는 $\alpha = 1/3$ 일 때 파케트전송확률에 따르는 분집이 있는 경우와 없는 경우의 에네르기비를 보여준다. 그림 2에서 보는바와 같이 $\alpha = 1/5$ 인 경우에 비하여 분집을 리

용하면 좀더 좋아진다는것을 알수 있다.



ㄱ) $\alpha=1/5$ 일 때



ㄴ) $\alpha=1/3$ 일 때

그림 2. 파के트전송확률에 따르는 분집이 있는 경우와 없는 경우의 에너지비

그림 3은 각이한 L^2 -QAM별자리에서 SNR에 따르는 BER모의특성을 보여준다.

그림에서 P_1 과 P_2 는 각각 분집을 리용하지 않은 경우와 리용한 경우이다. 그림에서 보는바와 같이 분집을 리용하는 경우 BER특성이 좋아진다. 즉 BER가 일정할 때 에너지소비를 줄일수 있다는것을 알수 있다. 이 특성은 L^2 -QAM별자리종류에는 거의 관계되지 않는다.

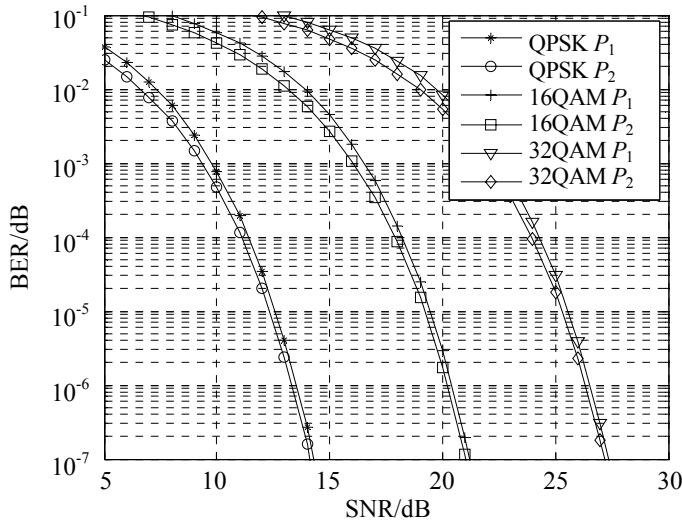


그림 3. L^2 -QAM별자리에서 SNR에 따르는 BER모의특성

맺는 말

전력조종을 진행하지 않는 경우 파के트전송실패를 고려할 때 WSN에서 협동분집의 구체적인 전송방식과 이 방법의 이론적인 성능을 에네르기소비, 파케트도착확률 등 여러 측면에서 해석하였다.

파케트전송성공확률이 0.7일 때 β 가 클수록 즉 수신신호전력이 송신신호전력에 가깝게 다가갈수록 협동분집을 리용하는 경우 리용하지 않는 경우에 비하여 에네르기소비가 전반적으로 약간 작아진다. 각이한 L^2 -QAM별자리에서 SNR에 따르는 BER특성을 모의해본 결과 분집을 리용하는 경우 BER특성이 좋아진다. 즉 BER가 일정할 때 에네르기소비를 줄일수 있다.

참고 문헌

- [1] Yanwei Wu et al.; IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 21, 2, 275, 2010.
- [2] G. Campobello et al.; IEEE/ACM Transactions on Networking, 20, 1, 189, 2012.
- [3] O. Niyazi; Turk J. Elec. Eng. & Comp. Sci., 19, 1, 133, 2011.
- [4] S. D. Santumon et al.; International Journal of Distributed and Parallel Systems(IJDPS), 3, 4, 183, 2012.
- [5] Markku Juntti et al.; IEEE Communications Magazine, 118, 2014.
- [6] Xiqi Gao et al.; IEEE Trans. on Communications, 55, 11, 2210, 2012.

A Method of Theoretical Analysis of Cooperative Diversity in Wireless Sensor Network

Kim Thae Guk, Choe Un Gyong

In this paper, we proposed the transmitting method of cooperative diversity with considering packet transmit failure in case that the transmission power levels were fixed in WSN and analyzed the theoretical performance of this method in terms of energy consumption and packet arrival probability.

We simulated BER versus SNR in various L^2 -QAM constellations. As the result, we can see that energy consumption can be reduced in case that cooperative diversity is used.

Key words: wireless sensor network, cooperative diversity