

## 연속위상변조를 리용한 무선수감부망에서 다중경로협동분집적용의 한가지 방법

김래국, 남철만

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《정보통신을 최첨단수준으로 발전시키는데 힘을 넣어야 합니다.》

무선수감부망(WSN: Wireless Sensor Network)은 에너지를 비롯한 자원이 제한되어있기 때문에 이에 대처하는 방법들[1-3]이 제안되고있다. 연속위상변조(CPM: Continuous Phase Modulation)[2]는 에너지와 대역너비에서 효율이 높은 변조방식이며 상수포락특성을 가지는것으로 하여 비선형증폭기를 리용하는 무선통신체계들에서 매우 효율적인 성능을 가진다. 그러나 WSN통신체계에서 CPM과 협동분집을 결합하는 방법에 대하여서는 취급하지 못하였다.

본문에서는 무선수감부망의 성능을 높이기 위해 변조방식선택과 협동분집을 도입하고 두 모형에서의 에너지비 및 기타 성능을 분석하였다.

### 1. 이론적인 해석

본문에서 제안하는 협동분집전송모형에서 원천마디는 첫 시간주기  $T$ 동안( $T = T_{tx} + T_{Hop}$ ) 중계마디와 목적마디에 패킷을 모두 전송하고 수신단을 꺼버린다. 그러나 협동분집전송모형[3]에서 원천마디는 첫 시간주기동안에 중계마디에로만 패킷을 보내며 두번째 시간주기에서는 목적마디에로 자료패킷을 전송한다.

결국 본문에서 제안하는 방법에서 원천마디  $S$ 의 에너지소비는

$$E_S^{CPM+div} = P_{tx} \cdot T_{tx} \quad (1)$$

이고 선행방법[3]에서는

$$E_S'^{CPM+div} = P_{tx} \cdot T_{tx} + P_{rcv} \cdot T_{Hop} + P_{tx} \cdot T_{tx} \quad (2)$$

로 커지며 대신 목적마디  $D$ 에서의 에너지소비는

$$E_D^{CPM+div} = P_{rcv} \cdot T_{tx} + P_{rcv} \cdot T_{Hop} + P_{rcv} \cdot T_{tx} \quad (3)$$

$$E_D'^{CPM+div} = P_{rcv} \cdot T_{tx} \quad (4)$$

로 줄어든다. 여기서  $E_S^{CPM+div}$  와  $E_S'^{CPM+div}$  그리고  $E_D^{CPM+div}$  와  $E_D'^{CPM+div}$  는 각각 제안한 방법과 선행방법[3]에서의 연속위상변조와 협동분집을 결합한 경우 원천마디와 목적마디에서의 에너지소비이다. 또한  $P_{tx}$ ,  $T_{tx}$ ,  $P_{rcv}$ ,  $T_{Hop}$  들은 선행방법[1]에서의 파라미터들과 같다.

$P_{rcv} = P_{lst}$  인 경우에도 역시 같은 방법으로 계산되며 중계마디  $M$ 에서의 에너지소비

도 같다. 총에너르기소모는 제안방법의 경우

$$E_{total}^{CPM+div} = P_{tx} \cdot T_{tx} (1 + \eta) + 3P_{rcv} \cdot T_{tx} + P_{rcv} \cdot T_{Hop} \quad (5)$$

이고 선행방법[3]에서 파케트전송성공률  $\eta$ 를 고려하면

$$E'_{total}^{CPM+div} = P_{tx} \cdot T_{tx} (2 + \eta) + 2P_{rcv} \cdot T_{tx} + P_{rcv} \cdot T_{Hop} \quad (6)$$

로서  $E'_{total}^{CPM+div}$ 에서보다  $(P_{tx} - P_{rcv})T_{tx}$ 만큼 늘어난다. 여기서  $E_{total}^{CPM+div}$ 와  $E'_{total}^{CPM+div}$ 는 각각 제안방법과 선행방법[3]에서 연속위상변조와 협동분집을 결합한 경우 총에너르기소모이다.

$P_{rcv}=0.75P_{tx}$ ,  $T_{Hop}=2T_{tx}$ ,  $\eta=0.7$ 일 때 에너르기소비의 차는 전체 에너르기소비의 5%이다. 다시말하여 제안방법으로 CPM이나 협동분집을 결합하면 선행방법에 비해 5%정도의 에너르기를 절약한다.

협동분집모형이 선행방법[1]에서와 같으므로 파케트전송확률도 역시 같으며 협동분집이 일어날 확률도 역시 같다.

$$P_{packet}^{CPM+div} = P_{packet}^{div} = \eta + \eta^2 + \eta^3 \quad (7)$$

$$P_{packet}^{CPM+div}(2) = P_{packet}^{div}(2) = \eta^3 \quad (8)$$

여기서  $P_{packet}^{CPM+div}$ 와  $P_{packet}^{CPM+div}(2)$ 는 제안방법에서 연속위상변조와 협동분집을 결합한 경우 각각 1개와 2개의 파케트가 성공적으로 전송될 확률이다.

M-CPM의 비트오류률(BER: Bit Error Rate)[3]은 다음과 같다.[3]

$$P_b^{CPM} = (M-1)Q(\sqrt{\Gamma}) \quad (9)$$

여기서  $\Gamma$ 는 SNR(감마단위로 된)이다.

따라서 다중경로에 기초한 협동분집과 CPM을 결합할 때 협동분집의 결과 부분적인 SNR의 합이 합성신호의 SNR이라는것을 고려하면 WSN에서의 BER는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_b^{CPM+div}(\Gamma) = & \left(1 - \frac{\eta^3}{\eta + \eta^2 - \eta^3}\right) (M-1) Q(\sqrt{\Gamma}) + \\ & + (M-1) \frac{\eta^3}{\eta + \eta^2 - \eta^3} Q(2\Gamma) \end{aligned} \quad (10)$$

$L^2$ -QAM인 경우의 식과 비교해보기 위하여  $M = L^2$ 으로 하고 식 (10)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_b^{CPM+div}(\Gamma) = & \left(1 - \frac{\eta^3}{\eta + \eta^2 - \eta^3}\right) (L^2 - 1) Q(\sqrt{\Gamma}) + \\ & + (L^2 - 1) \frac{\eta^3}{\eta + \eta^2 - \eta^3} Q(2\Gamma) \end{aligned} \quad (11)$$

론문에서 제안한 CPM을 리용하는 협동분집모형과 선행연구에서 제안한 협동분집모형[3]에서의 신호들의 복잡도를 분석하여보자.

수신신호주기  $T$ 에서 AF방식으로 목적마디  $D$ 에서 수신된 신호는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$r_D^{(1)} = \sqrt{E_{SD}} h_{SD} x_1 + n_D \quad (12)$$

여기서  $x_1$ 은 원천마디로부터 목적마디에로 송신된 신호,  $\sqrt{E_{SD}}$ 는  $S \rightarrow D$  경로손실 및 음영효과를 고려한 신호에너지,  $h_{SD}$ 는  $S \rightarrow D$  경로의 통로리득,  $n_D$ 는 평균값이 0이고 분산이  $N_0$ 인 AWGN잡음이다.

동시에 중계마디  $M$ 에서의 수신신호도 역시 다음과 같이 쓸수 있다.

$$r_M = \sqrt{E_{SM}} h_{SM} x_1 + n_M \quad (13)$$

여기서  $\sqrt{E_{SM}}$ 는  $S \rightarrow M$  경로손실 및 음영효과를 고려한 신호에너지,  $h_{SM}$ 은  $S \rightarrow M$  경로의 통로리득,  $n_M$ 은 평균값이 0이고 분산이  $N_0$ 인 AWGN잡음이다.

AF방식에서 중계마디  $M$ 에서 수신신호에 대해 규준화처리를 진행하여 신호의 평균 에너지를 1로 되게 한다.(규준화인수를  $\sqrt{E(|r_M|^2)}$ 으로 한다. 여기서  $E[\cdot]$ 는 기대값연산자이다.)

두번째 시간  $T$ 에서  $r_M$ 에 대하여 규준화처리를 한  $r'_M$ 를 목적마디  $D$ 가 받게 된다.

결국 목적마디  $D$ 는 다음과 같은 신호를 받게 된다.

$$r_D^{(2)} = \frac{\sqrt{E_{MD}}}{\sqrt{E(|r_M|^2)}} r'_M h_{MD} + n'_D \quad (14)$$

여기서  $\sqrt{E_{MD}}$ 는  $M \rightarrow D$  경로손실 및 음영효과를 고려한 신호에너지,  $h_{MD}$ 는  $M \rightarrow D$  경로의 복소통로리득,  $n'_D$ 는 평균값이 0이고 분산이  $N_0$ 인 AWGN잡음이다.

식 (14)를 선행방법[3]과 대비해보자. 여기서 중계마디를 선행방법[3]에서는  $R$ 로, 논문에서는  $M$ 으로 표기하였다는것을 고려하여야 한다.

보는바와 같이 선행방법에서(자료파케트전송량이 1이라고 함) 목적마디는 원천마디로부터  $S \rightarrow M \rightarrow D$ ,  $S \rightarrow D$  두 경로의 신호를 다같이 동시에 받게 되는데 제안방법에서는  $S \rightarrow D$ 경로의 신호를 먼저 받은 후  $S \rightarrow M \rightarrow D$ 경로의 신호를 받게 된다.

따라서 선행방법에서는 척도

$$M_{CD}^{AF} = \sum_k |h_{MD,k} \exp\{j\theta_{1,k}\} + h_{SD,k} \exp\{j\theta_{2,k}\} - r_{D,k}^{AF}|^2 \quad (15)$$

을 최소로 하는 신호검출을 위해 비터비알고리즘을 리용한다. 여기서  $CD$ 는 간섭성검출을 의미하며

$$r_{D,k}^{AF} = \frac{\sqrt{E_{MD}} r_{M,k}}{\sqrt{E(|r_M|^2)}} h_{MD,k} + \sqrt{E_{SD}} h_{SD,k} x_{2,k} + n_{D,k} \quad (16)$$

는 수신기에서의 표준수신신호이다. 여기서 첨수  $k$ 는 규준화첨수,  $x_2$ 는 두번째 시간주기에서 원천마디로부터 보낸 신호이다. 또한  $\theta_{1,k}$ ,  $\theta_{2,k}$ 들은 각각  $k$ 번째 기호구간에서  $M \rightarrow D$ ,  $S \rightarrow D$ 경로들에서의 신호의 위상이다.

문제는 이 방법의 계산복잡도이다. 식 (15)가 비터비복호화를 진행할 때 비터비복호화의 계산복잡도가 추적하는 변수가  $L$ 인 경우  $2^{kL}$ 이라는것은 잘 알려져있다.(여기서  $k$ 는 교착길이, 교착길이 등에 의해 규정되는 비례결수이다.)

선행방법을 리용할 때 계산복잡도는  $2^{2k}$ 으로 된다. 반면에 제안한 방법을 리용하면 목적마디로 하여금 복잡도가 각각  $2^{kL}$

$$M_{CD}^{AF}(1) = \sum_k \left| r_{D,k}^{(1)} - r_{D,k}^{(1)AF} \right|^2 \quad (17)$$

와

$$M_{CD}^{AF}(2) = \sum_k \left| r_{D,k}^{(2)} - r_{D,k}^{(2)AF} \right|^2 \quad (18)$$

의 최소화를 진행하는 비터비복호화를 해야 하므로 복잡도가  $2 \cdot 2^k = 2^{k+1}$ 으로 크게 줄어든다.( $k$ 는 보통 수십~수백의 범위에 있다.)

## 2. 성능 비교

CPM과  $L^2$ -QAM을 리용할 때 WSN에서의 BER성능을 비교한 결과는 그림과 같다. 실선과 파선은 각각 협동분집을 리용하지 않은 경우와 리용하는 경우이다.

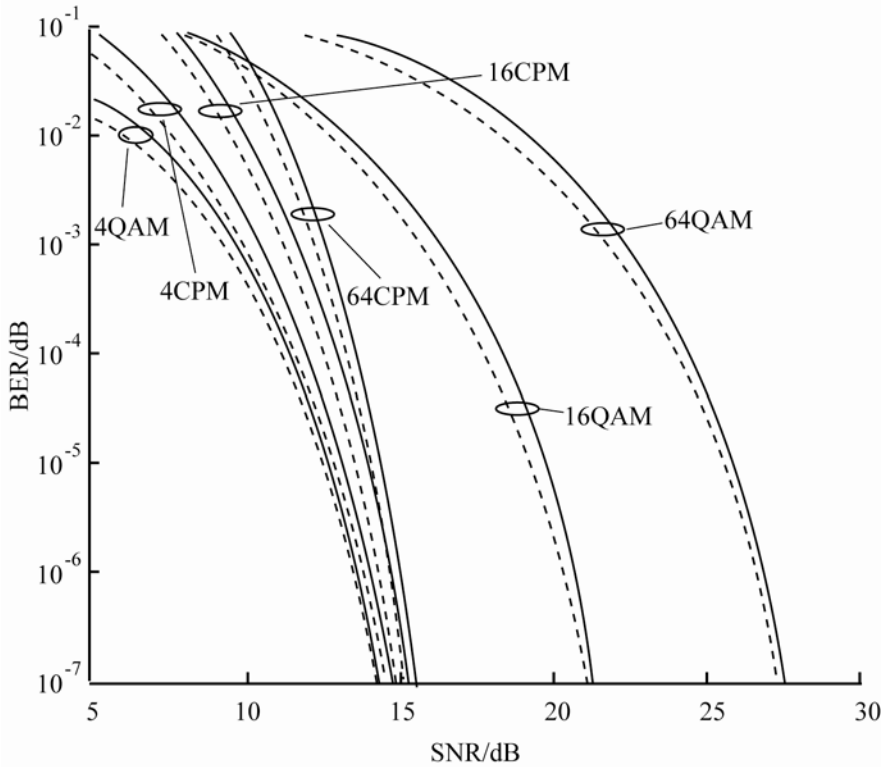


그림. CPM 및  $L^2$ -QAM방식들에서의 BER성능

보는바와 같이 변조기호수가 작을수록 즉 QPSK( $L^2$ -QAM에서  $L=2$ 인 경우)는 4CPM에 비해 우수한 BER성능(2~4dB)을 보여주지만 16-QAM에 비해 16-CPM은 3~6dB만큼 낮은 BER를 가지게 된다. 더우기 64-QAM에 비해 64-CPM은 10dB정도 낮은 BER를 보장한다. 그것은 CPM의 BER가

$$P_b^{CPM}(\Gamma) = (L^2 - 1)Q(\Gamma)$$

인데 비하여  $L^2$ -QAM의 BER는

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

이기때문이다.

두 식들에서 볼수 있는바와 같이  $L^2$ 이 크면  $Q$ 함수안의 함수값이  $L^2$ -QAM에서는  $L^2$ -CPM에 비해 매우 작기때문에  $Q$ 함수의 특성으로 하여  $L^2$ -QAM에서의 BER가  $L^2$ -CPM에 비해 커진다.

## 맺 는 말

변조방식선택과 협동분집을 무선수감부망에 도입하고 에네르기소비 및 기타 성능을 분석한 결과 CPM을 리용하는 WSN은 변조기호수가 비교적 큰 경우  $L^2$ -QAM을 사용하는 WSN에 비하여 우수한 BER성능(2~4dB)을 보여주었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(정보과학), 64, 1, 23, 주체107(2018).
- [2] J. Roselin; Ad Hoc Networks, 62, 2, 1, 2017.
- [3] Niyazi; Turk J. Elec. Eng. & Comp. Sci., 19, 1, 133, 2011.

주체107(2018)년 5월 5일 원고접수

## A Method for Multipath Cooperative Diversity Application in WSN Using CPM

*Kim Thae Guk, Nam Chol Man*

In this paper, modulation scheme selection and cooperative diversity are applied to Wireless Sensor Network(WSN) and the performance on energy consumption and other indicators was analyzed.

WSN using CPM(Continuous Phase Modulation) shows better performance of BER(2~4dB) than that of WSN using  $L^2$ -QAM when the number of modulation symbols is comparatively big.

Key words: continuous phase modulation(CPM), wireless sensor network(WSN), cooperative diversity