Ad-hoc 네트워크의 Throughput 향상을 위한 적응적 MCS 레벨 기반의 분산형 전력 제어 알고리즘

준회원 김 영 범*, 정회원 왕 우 붕*, 종신회원 장 경 희*,
정회원 윤 창 호**, 박 종 원**, 임 용 곤**

Distributed Bit Loading and Power Control Algorithm to Increase System Throughput of Ad-hoc Network

YoungBum Kim* *Associate Member*, Yupeng Wang* *Regular Member*,
KyungHi Chang* *Lifelong Member*,
ChangHo Yun**, JongWon Park**, YongKon Lim** *Regular Members*

요 약

Ad-hoc 네트워크에서는 전력을 제어할 기지국의 부재로 시스템의 성능을 최적화 시키는 중앙 전력 제어가 불가능하여, 각 노드들은 독립적이고 자동적인 방식으로 분산형 전력 제어 알고리즘을 수행해야 한다. 기존의 분산형 전력 제어 알고리즘은 수신 신호의 SINR (singal to interference and noise ratio)에 따라 MCS (modulation and coding scheme) 레벨을 변화 시키는 adaptive bit loading operation을 고려하지 않기 때문에, 전체 throughput 향상에 제한이 있다. 본 논문에서는 Ad-hoc 환경에서 전체 throughput 을 향상시키고, outage 확률을 낮추기 위해 MCS 레벨에 따라 adaptive bit loading operation을 고려한 분산형 전력 제어 알고리즘을 제안한다. 컴퓨터 모의 실험 결과 매우 큰 throughput 향상과 outage 확률 감소의 성능 향상을 확인할 수 있다.

Key Words : Distributed Power Control, Ad-hoc, MCS Level, Distributed Bit Loading, Power Control

ABSTRACT

In Ad-hoc networks, centralized power control is not suitable due to the absence of base stations, which perform the power control operation in the network to optimize the system performance. Therefore, each node should perform power control algorithm distributedly instead of the centralized one. The conventional distributed power control algorithm does not consider the adaptive bit loading operation to change the MCS (modulation and coding scheme) according to the received SINR (signal to interference and noise ratio), which limits the system throughput. In this paper, we propose a novel distributed bit loading and power control algorithm, which considers the adaptive bit loading operation to increase total system throughput and decrease outage probability. Simulation results show that the proposed algorithm performs much better than the conventional algorithm.

Ⅰ. 서 론

Ad-hoc 네트워크에서는 기지국이 존재하지 않기 때문에, 간섭을 완화시켜 시스템의 성능을 최적화시키는 중앙 전력제어가 불가능하다. 기존의 분산형 전력 제어 알고리즘은 adaptive bit loading operation

※ 본 논문은 국토해양부의 연구사업인 "해양 RF 기반 선박용 Ad-hoc 네트워크 개발"과제에서 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

* 인하대학교 정보통신대학원 이동통신 연구실 (kimyb2000@hanmail.net, charles535@hotmail.com, khchang@inha.ac.kr)
** 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 (sgn0178@moeri.re.kr, poetwon@moeri.re.kr, yklim@moeri.re.kr)

논문번호 : KICS2010-01-039, 접수일자 : 2010년 1월 26일, 최종논문접수일자 : 2010년 4월 7일

을 제외한 전력 제어만을 수행하기에 throughput 향상에 한계가 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 본 논문은 novel distributed bit loading and power control (DBLPC) 알고리즘을 제안한다. 위의 알고리즘은 adaptive bit loading operation과 전력제어를 동시에 수행하는 알고리즘을 수행하기에 시스템의 throughput을 향상에 한계가 있다. 만약 각 노드들이 전력 제어 알고리즘을 사용하지 않고, 자신의 최대 전력으로 송신을 한다면 이는 다른 노드들에게 큰 간섭으로 작용하여 시스템 전체 throughput을 감소시키는 요인이 될 것이다. 따라서 각 노드 스스로가 목표 SINR을 만족하면서 최소한의 송신 전력을 사용하기 위한 분산형 전력 제어 알고리즘의 적용은 필수적이다.

본 논문에서는 Ad-hoc 네트워크 내의 각 노드들이 자신의 목표 SINR을 만족하면서 최대 송신 전력보다 작은 전력으로 송신하고 있는 경우, 잉여전력을 이용하여 자신의 MCS 레벨을 업데이트하는 새로운 분산형 전력 제어 알고리즘을 제안한다. 이러한 MCS 레벨 업데이트를 통하여 시스템 전체 throughput 을 향상시키고, outage 확률을 감소시킬 수 있다.

본 논문의 2장에서는 기존의 분산형 전력 제어 알고리즘에 대해 살펴본다. 3장에서는 제안한 MCS 레벨을 고려한 분산형 전력 제어 알고리즘에 대해 소개하고, 4장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 기존 알고리즘과의 전체 throughput 및 outage 확률을 비교하며 5장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 기존의 분산형 전력 제어 알고리즘

2.1 Foschini and Miljanic's DPC Algorithm

Foschini와 Miljanic의 Distributed Power Control (DPC) 알고리즘은 가장 많이 인용되는 알고리즘으로서 수신 SINR을 이용하여 반복적으로 송신 전력을 업데이트 하는 방식의 알고리즘이다 [1]. 수신 SINR은 다음과 같은 식을 이용하여 모델링 된다[2].

$$R_i = \frac{G_{ii}P_i}{\sum_{j\neq i} G_{ij}P_j + \eta_i}, \qquad i,j \in \{1,2,3,\ldots,N\} \tag{1}$$

여기서, i와 j는 각 링크의 인덱스를 나타내며, Gij는 j 링크에서 i 링크로의 전력 이득 (or 전력 손실) 을 나타낸다. Pi 는 i 링크의 전력을, Ri는 i 링크의 수신단에서의 thermal noise를 나타낸다. i 링크가 링크를 유지하기 위해서는 다음과 같은 식을 만족해야 한다.

$$R_i \geq \gamma_i, \quad i \in 1,2,3,\ldots,N \tag{2}$$

여기서, γi는 i 링크의 링크를 유지하기 위한 SINR 임계값이다.

식 (1)에 식(2)을 적용하여 행렬식으로 변환하면 다음과 같다 [2].

$$\mathbf{(I - F)P} \geq \mathbf{u}, \tag{3}$$

where $\mathbf{P}=[P_1, P_2, \ldots, P_N]$는 전송전력의 열행렬이다.

$$\mathbf{u}=[\frac{\gamma_1\eta_1}{G_{11}}, \frac{\gamma_2\eta_2}{G_{22}}, \ldots, \frac{\gamma_i\eta_i}{G_{ii}}, \ldots, \frac{\gamma_N\eta_N}{G_{NN}}]^T \tag{4}$$

u는 SINR requirement에서 채널이득의 비율의해 정규화된 노이즈 변수 열행렬이다.

$$F_{ij} = \frac{\gamma_i G_{ij}}{G_{ii}} \mathbf{1}_{\{i\neq j\}} \tag{5}$$

식 (2)를 만족하기 위해 각 사용자의 반복되는 송신전력은 다음과 같은 식을 사용하여 업데이트 되어야 한다.

$$\mathbf{P}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{P}(k) + \mathbf{u} \tag{6}$$

식 (6)을 다시 $R_i(k)$로부터 SINR으로 표현하면 다음과 같다.

$$p_i(k+1) = \frac{\gamma_i}{R_i(k)} P_i(k) \tag{7}$$

식 (7)에 의해 현재 송신 전력과 수신 SINR을 통해 다음 번 송신 전력을 결정하게 되고, 이를 반복하여 수행하면, 수신 SINR은 임계값인 gi 에 수렴하게 된다. 그림 1은 위에서 설명한 Foschini와 Miljanic의 분산형 전력 제어 알고리즘을 사용했을 때, 반복횟수에 따른 수신 SINR의 변화를 나타낸다. 새로운 사용자가 추가되기 전까지 두 사용자의 수신 SINR이 수렴하는 것을 볼 수 있다. 새로운 사

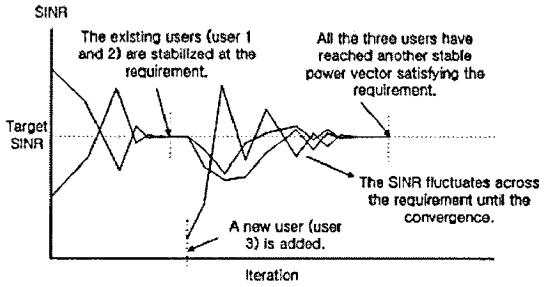


그림 1. Foschini와 Miljanic의 분산형 전력 제어 알고리즘을 통한 SINR의 변화량 [2]

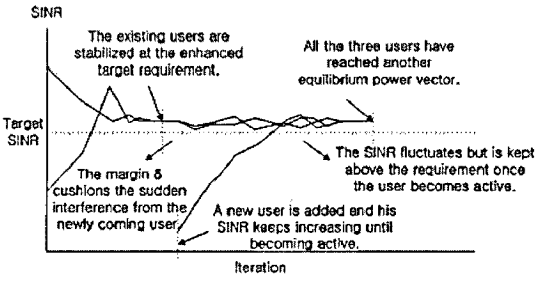


그림 2. DPC-ALP 알고리즘을 통한 SINR의 변화량 [2]

용자가 추가 된 이후에는 각 사용자의 수신 SINR이 임계값을 기준으로 크게 요동치다가 다시 얼마간의 전력 업데이트 이후 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 Foschini와 Miljanic의 분산형 전력 제어 알고리즘의 문제점은 수렴하는 동안에 임계값을 보장받을 수 없고, 새로운 사용자가 추가될 때 기존의 사용자의 링크가 끊어지는 경우가 발생할 수 있다는 것이다.

이를 보완하기 위해 기존 사용자를 보호하면서, 수렴하는 도중에 임계값을 보장받을 수 있는 Distributed Power Control with Active Link Protection (DPC-ALP) 알고리즘이 제안되었다.

2.2 DPC-ALP

DPC-ALP 알고리즘은 앞서 설명한 바와 같이 Foschini와 Miljanic의 DPC 알고리즘의 문제점을 보완하기 위해 제안된 알고리즘이다 [3]. 기본적인 아이디어는 매우 간단하다. 전력 업데이트 시 사용되는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$P_i(k+1)=\begin{cases}\dfrac{\gamma_i\delta}{R_i(k)}P_i(k), & \text{if } R_i(k)\geq\gamma_i,\\ \delta P_i(k), & \text{if } R_i(k)<\gamma_i,\end{cases} \quad (8)$$

현재 수신 SINR이 임계값보다 클 때는 기존의 알고리즘을 사용하되, δ 라는 1 보다 약간 큰 값을 갖는 파라미터를 삽입함으로써, 수신 SINR이 수렴하는 과정에서 임계값을 보장할 수 있도록 하였다. 수신 SINR이 임계값보다 작을 때는 식 (8)의 아래쪽 식을 사용하여 δ 를 곱함으로써, 수신 SINR을 조금씩 증가시켜 기존의 링크가 새로운 링크로 인해 받는 영향을 최소화 하였다. 이러한 DPC-ALP의 전력 업데이트 반복횟수에 따른 수신 SINR의 변화를 그림 2에 나타냈다. 새로운 링크가 추가되기 전까지 수렴하는 과정에서 δ 만큼의 margin 으로 인해 임계값을 보장받는 것을 확인할 수 있다. 또한, 새로운 링크가 추가된 이후에는 새로운 링크가 조금씩 SINR을 증가시킴으로써, 기존의 링크들이 그림 1에 비해 요동치는 정도가 작아 SINR 임계값을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 제안된 MCS 레벨을 고려한 분산형 전력 제어 알고리즘

앞서 설명한 바와 같이 기존의 알고리즘은 임계값을 고정함으로써 MCS 레벨을 고려하지 않는 방식으로 이는 시스템의 전체 throughput을 향상시키기에 제한이 있다. 따라서 본 연구에서는 기지국이 존재하지 않는 Ad-hoc 상황에서 각 노드들이 스스로 MCS 레벨을 업데이트하여 링크의 채널 상황에 맞는 MCS 레벨을 결정하도록 하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 기본적인 전력 업데이트 알고리즘은 2.2 절에서 설명한 DPC-ALP 방식을 사용한다. 그림 3 은 본 논문에서 제안한 MCS 레벨을 고려한 분산형 전력 제어 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 결정된 MCS 레벨의 SINR 임계값을 통해 송신 전력을 업데이트하는 Inner Loop과, MCS 레벨을 결정하기 위한 Outer Loop 으로 구성된다.

우선, 각 링크에 초기 전력을 임의로 설정한다. 설정한 송신 전력을 사용해 송신을 한 뒤, 수신단에서 수신 SINR 값과 가장 가까운 값을 갖는 MCS 레벨로 초기 MCS 레벨을 설정한다. 이후 전력 업데이트는 기존의 DPC-ALP 알고리즘을 이용하여 수행하게 된다. 전력 업데이트를 수행하면서 MCS 레벨을 적응적으로 변화시키기 위하여 convergence 파라미터를 사용한다.

$$c_i=\begin{cases}c_i+1, & \text{if } R_i(k)\geq\gamma_i,\\ 0, & \text{if } R_i(k)<\gamma_i,\end{cases} \quad (9)$$

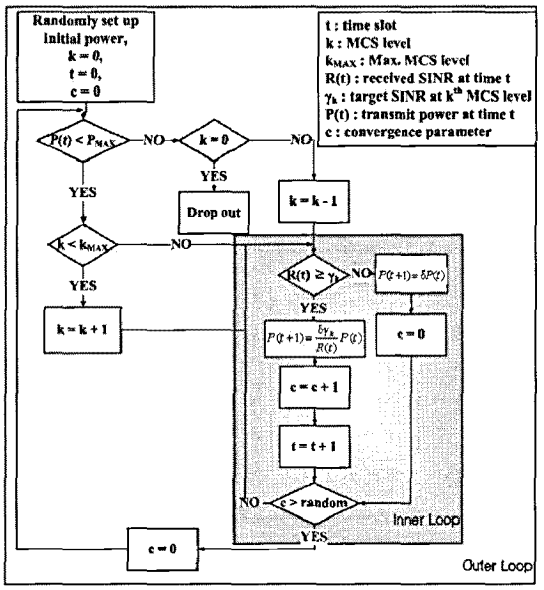


그림 3. 제안된 MCS 레벨을 고려한 분산형 전력 제어 알고리즘

여기서 ci 는 i링크의 수렴상태를 확인하기 위한 파라미터로서 수신 SINR 이 target SINR 값보다 클 때 순차적으로 증가시키고, target SINR 보다 작으면 0으로 재설정하게 된다. 이렇게 설정한 ci 값을 가지고 다음의 식을 사용하여 MCS 레벨을 적응적으로 변화시키게 된다.

$$MCS_i = \begin{cases} MCS_i + 1, & \text{if } c_i \geq \max_c_i, \\ MCS_i - 1, & \text{if } P_i(t) < P_{MAX}, \\ Drop\ out, & \text{if } P_i(t) < P_{MAX} \\ & \quad and\ MCS_i = 0, \\ MCS_i, & otherwise, \end{cases} \quad (10)$$

여기서, MCSi 는 i링크의 MCS 레벨을 나타내고, max_ci 는 랜덤하게 설정한 최대 convergence 파라미터로 ci 가 max_ci 보다 커지면 해당링크의 수신 SINR 이 수렴되었다고 판단하여 MCS 레벨을 한 단계 업데이트 하게 된다. 또한, DPC-ALP 알고리즘을 $\mu\mu\mu$계산된 송신 전력이 송신 가능한 최대 전력 보다 커진 경우에는 현재의 MCS 레벨을 만족시킬 수 없기 때문에다 커진 경우에는 한 단계 낮추어 설정하고, 만약 현재의 MCS 레벨이 가장 낮은 레벨인 0 (사용자의 수신 SINR이 목표 SINR MCS 0 레벨 보다 낮은 경우 outage 상태가 된다.) 경우에는 이 링크를 더 이상 유지할 수 없는 링크라고 판단하여 drop out을 시키게 된다. 이러한 경우를 제외하고는 기존의 MCS 레벨을 유지하여 전력 업데이트를 수행하게 된다.

Ⅳ. 모의실험을 통한 성능 분석

본 장에서는 제안된 MCS 레벨을 고려한 분산형 전력 제어 알고리즘을 사용한 방법과 기존 방법의 성능을 비교 분석한다. 표 1은 본 모의실험에서 사용한 파라미터를 정리한 표이고, 표 2는 각 MCS 레벨에 따른 PER 1%를 만족하는 SINR을 정리한 표이다 [4].

표 1. 모의실험 파라미터

Parameters	Value
중심 주파수	2.3 GHz
시스템 대역폭	10 MHz
최대 전력	36 dBm
셀 반경	100 km
Data Subcarrier 수	768
Symbol Time	152.6 μs
셀 내 노드 수	8

표 2. PER 1% 를 만족하는 required SINR (ITU-R M.1225 Ped-A 채널) [4]

변조 방식	부호화	SINR (dB)
QPSK	1/12	-3.89
QPSK	1/6	-1.57
QPSK	1/3	0.92
QPSK	1/2	3.10
QPSK	2/3	5.84
16QAM	1/2	8.64
16QAM	2/3	12.6
64QAM	2/3	17.1
64QAM	5/6	21.4

4.1 1-hop 만을 고려한 모의실험

본 절에서는 1-hop 만을 고려하여 모의실험을 수행하였다. 우선, 각 노드는 그림 4 와 같은 가로 세로 100 km 인 정사각형 안에 임의로 생성된다. 생성된 노드는 2 쌍씩 짝을 이뤄 링크를 형성하게 되고, 각각의 링크는 임의의 초기 전력을 가지고 통신을 시작하고, 제안된 전력 제어 알고리즘에 따라 전력 업데이트를 수행하게 된다.

그림 5 는 주어진 환경에서 모의실험을 통해 기존 알고리즘과 본 논문에서 제안된 알고리즘의 성능을 비

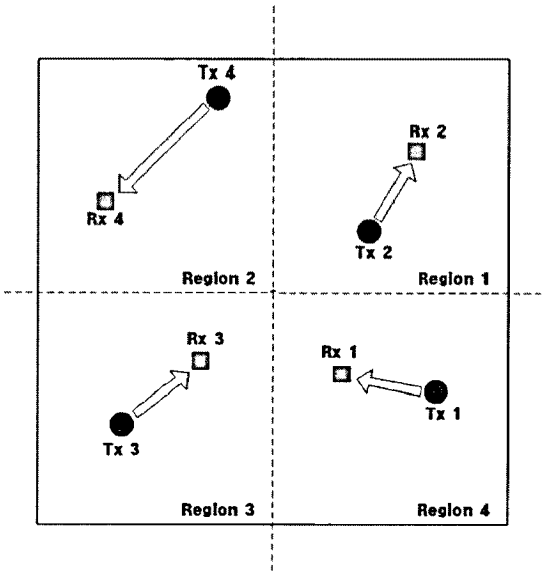
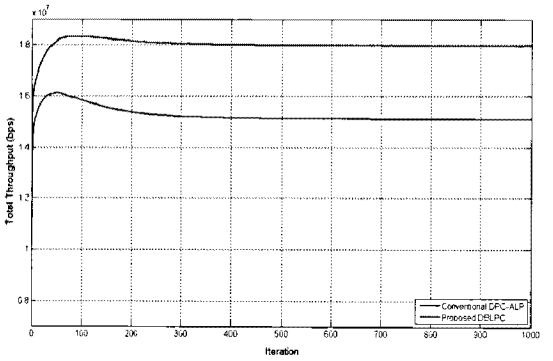
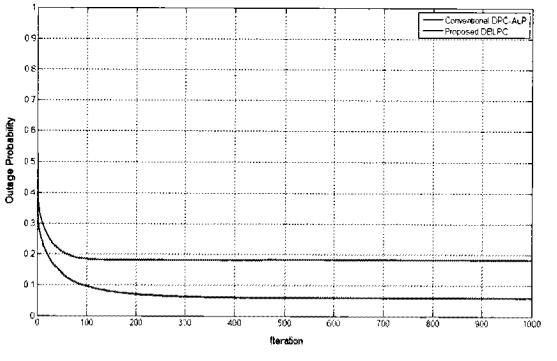


그림 4. 1-hop 만을 고려한 환경에서 임의의 초기 노드 생성 시나리오



(a)



(b)

그림 5. 1-hop 만을 고려한 모의실험에서 기존 알고리즘과 DBLPC 알고리즘의 성능 비교: (a) 전체 throughput, (b) outage 확률

교한 그래프이다. (a) 와 (b) 는 각각 전체 throughput 과 outage 확률을 나타낸다. 전체 throughput 의 경우 기존의 DPC-ALP 알고리즘을 사용할 때 보다 본 논문에서 제안한 MCS 레벨을 고려한 DBLPC 알고리즘을 사용하는 경우 19.4%만큼 전체 throughput 이 향상되는 것을 볼 수 있다. 제안된 DBLPC 알고리즘을 사용함으로써 높은 SINR의 사용자는 더 높은 데이터 전송율로 전송할 수 있다. 또한 outage 확률의 경우 기존의 DPC-ALP 알고리즘을 사용하는 경우 outage 확률이 18.2% 였지만, 제안한 DBLPC 알고리즘을 사용하는 경우에는 6.6% 로 11.6% 만큼의 outage 확률 감소 이득을 얻으며, 따라서 동일한 양 만큼의 간섭절감 효과를 갖는다.

4.2 Multi-hop 을 고려한 모의실험

본 절에서는 보다 Ad-hoc 과 유사한 환경에서의 성능 분석을 위하여 그림 6에서와 같이 라우팅을 통해 Multi-hop을 고려한 모의실험을 수행한다.

이 경우 본 논문은 전제 network를 영역으로 구분 하지 않으며, node의 위치는 랜덤적으로 생성되도록 설정한다. 또한, hop 라우팅 알고리즘의 최소 수는 라우트 회복에 의해서 정해지고, 최대 3-hop 까지 만을 지원하도록 한다.

그림 7 은 multi-hop을 고려한 환경에서 모의실험을 통해 전체 throughput 및 outage 확률의 성능을 비교한 그래프이다. (a) 와 (b) 는 각각 전체 throughput 과 outage 확률을 나타낸다.

Multi-hop을 고려하기 때문에 그림 5 에 비해 전반적인 전체 throughput이 낮은 것을 확인할 수 있

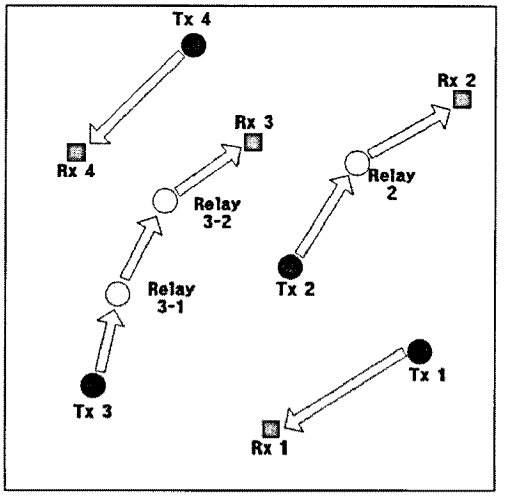
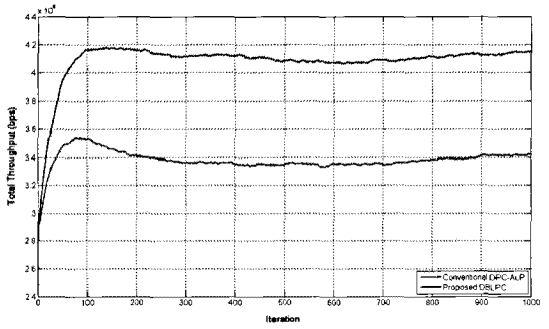
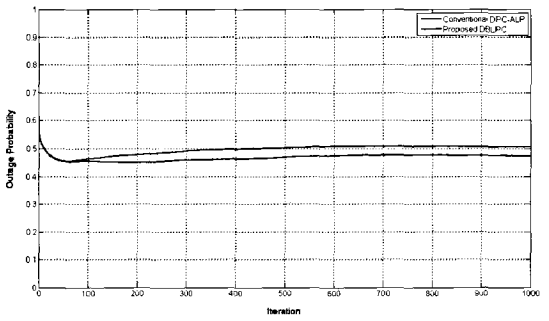


그림 6. Multi-hop을 고려한 환경에서 임의의 초기 노드 생성 시나리오



(a)



(b)

그림 7. Multi-hop을 고려한 모의실험에서 기존 알고리즘과 DBLPC 알고리즘의 성능 비교: (a) 전체 throughput, (b) outage 확률

다. 기존의 DPC-ALP 알고리즘을 사용할 때 보다 본 논문에서 제안한 MCS 레벨을 고려한 DBLPC 알고리즘을 사용할 때 21.9% 가량 전체 throughput이 향상되는 것을 볼 수 있다. Outage 확률의 경우 Multi-hop을 고려했기 때문에 outage 확률이 1-hop만을 고려했을 경우보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Admission control이 이루어지지 않기 때문에 워낙 높은 outage 확률을 갖게 되고, 이로 인해 제안한 알고리즘을 사용하여 3.7% 가량의 outage 확률 성능 개선을 확인할 수 있다.

모의실험 결과, 기존의 DPC-ALP 알고리즘에 MCS 레벨을 고려하도록 하는 DBLPC 알고리즘을 사용함으로써, 전체 throughput 과 outage 확률의 성능을 보다 향상시킴을 입증하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 Ad-hoc 환경에서 전체 throughput을 향상시키고, outage 성능을 개선하기 위한 MCS 레벨을 고려한 분산형 전력 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 분산형 전력 제어 알고리즘은 송신단의 잉여전력을 사용하여 MCS 레벨을 업데이트 함으로써 전체 시스템 throughput을 향상시키고, outage 확률을 감소시키는 성능 향상을 보였다. 분산형 전력 제어 알고리즘에 adaptive bit loading operation을 추가함으로써 제안된 DBLPC 알고리즘은 시스템 전체 throughput, outage 확률, 그리고 간섭 간의 트레이드오프 최적화를 가능하게 하였다. 모의실험을 통해 1-hop 환경에서의 경우 19.4% 만큼의 전체 시스템 throughput 향상 및 11.6% 만큼의 outage 확률 감소 효과를 볼 수 있었고, multi-hop 환경에서의 경우 21.9%의 전체 시스템 throughput 향상과 3.6%의 outage 확률 감소를 확인할 수 있었다. 또한, 제안된 DBLPC 알고리즘으로 인하여 ship ad-hoc network의 주파수 효율 개선이 기대된다.

참 고 문 헌

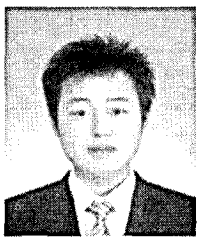
[1] G.J. Foschini, Z. Miljanic, "A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.42, No.4, pp.641-646, Nov., 1993.

[2] B. G. Lee, D.Y. Park, and H.B. Seo, *Wireless Communications Resource Management*, Wiley, 2009, Chapter 6.

[3] N. Bambos, S. C. Chen, and G.J. Pottie, "Radio link admission algorithmsfor wireless networks with power control and active link quality protection," in *Proc. IEEE INFOCOM '95*, Boston, MA, 1995.

[4] 고상준, 허주, 장경희, "다중 사용자 OFDMA 시스템에서의 사용자간 전송효율 최적화를 위한 Aggressive Subchannel Allocation 알고리즘", *한국통신학회논문지*, Vol.31, No.6A, pp.617-626, 2006. 06.

김 영 범 (YoungBum Kim) 준회원



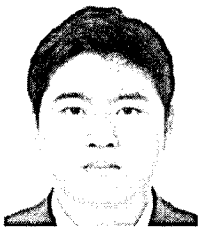
2008년 2월 인하대학교 전자공학과 학사

2010년 2월 인하대학교 정보통신 대학원 석사

2010년 2월~현재 삼성전자

<관심분야> 4세대 이동통신 시스템, WiMAX 및 3GPP LTE 동기화 기술, Ad-hoc Network

왕 우 붕 (YuPeng Wang) 정회원



2004년 7월 동북대학교 통신공학과 (공학사)
2006년 7월 인하대학교 정보통신대학원 (공학석사)
2006년 9월~현재 인하대학교 정보통신대학원 박사과정
<관심분야> Mobile-WiMAX / 3GPP LTE 시스템, Radio Resource Management, Relay Network, MIMO Technique, UWB

장 경 희 (KyungHi Chang) 종신회원

1985년 2월 연세대학교 전자공학과 공학사
1987년 2월 연세대학교 전자공학과 공학석사
1992년 8월 Texas A & M Univ., EE Dept. (Ph.D.)
1989년~1990년 삼성종합기술원 주임연구원
1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구소 무선전송방식연구팀장 책임연구원
2003년현재 인하대학교 정보통신대학원 교수
<관심분야> 4세대 이동통신 및 3GPP LTE 무선전송방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술, Cognitive Radio, Cross-layer Design, Cooperative Relaying System, RFID/USN Systems, Mobile Ad-hoc Network, 해상/수중 통신 등

윤 창 호 (Changho Yun) 정회원

1999년 2월 창원대학교 전자공학과 학사
2004년 2월 광주과학기술원 정보통신공학과 석사
2007년 2월 광주과학기술원 정보통신공학과 박사
2008년 3월~현재 한국해양연구원 해양시스템기술연구본부 선임연구원
<관심분야> broadband convergence network (BcN), next generation network (NGN), IP multimedia subsystem (IMS), underwater acoustic network (UANet)

박 종 원 (Jongwon Park) 정회원

1995년 2월 아주대학교 전자공학과 학사
1997년 2월 아주대학교 전자공학과 석사
2006년 2월 아주대학교 전자공학과 박사
1997년~현재 한국해양연구원 해양시스템기술연구본부 선임연구원
2006년~현재 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 조교수
<관심분야> 수중통신, 수중통신 네트워크, 해양통신, 선박 IT-융합 시스템, 함정 자동화 체계 등

임 용 곤 (Jongwon Park) 정회원

1979년 2월 충남대학교 전기공학과 학사
1984년 2월 충남대학교 전력전자공학과 석사
1994년 2월 아주대학교 전자공학과 박사
1980년~현재 한국해양연구원 해양시스템기술연구본부 책임연구원/소장
2004년~현재 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 정교수/겸임교수
<관심분야> 수중통신 및 네트워크, 해양통신, 선박 IT-융합 시스템, 해운 물류 등