

이동통신 시스템에서의 최적 전력 제어 알고리즘 구현

황인식, 유관호
성균관대학교 정보통신공학부

Realization of Optimum Power Control Algorithm in Cellular Radio Systems

In-Sik Hwang, Kwan-Ho You
School of Information and Communication Engineering SungKyunKwan University

Abstract - 본 논문에서는 최적 전력 제어를 이용하여 이동국과 기지국간 최소의 소비 전력과 최대의 채널용량을 유지할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다. 이동통신 시스템은 한 기지국 안에 속한 가입자 사이에 간섭이 발생할 뿐 아니라 동일한 대역을 사용하는 기지국 사이에도 간섭이 발생하게 된다. 또한 이동통신 시스템은 열악한 무선 환경을 기반으로 수시로 변화하는 가입자 요구를 수용해야 한다. 따라서 가입자 요구에 적절히 대응하는 최적 전력 제어가 이루어져야 원활한 서비스를 가입자들에게 제공할 수 있다. 즉, 동시 통화를 시도하는 여러 가입자들 간의 간섭을 받지 않고 알맞은 통화의 질을 제공받을 수 있도록 하는 전력 제어의 과정이 필수적이다.

있고, 최적 전력 제어는 양수의 링크이득 행렬의 고유치의 값으로 문제를 평가한다. 최적 해법은 광범위한 정보를 이용하여 해결될 수 있으나, 계산상의 복잡성과 긴 처리시간으로 인한 지연을 요하는 집중 전력 제어 알고리즘은 실제의 적용에는 어려움이 따른다. 이에 반해 분산 전력 제어 알고리즘[3-4]은 부분적 정보만 이용하기에 짧은 지연으로 수렴할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 분산 전력 제어 알고리즘의 수렴속도를 향상시키는 알고리즘을 제안하고자 한다. 전형적 분산 전력제어 알고리즘보다 더 빠른 속도로 수렴시키기 위한 연구가 [5]에서 제안되었다. 본 논문은 [5]에서 제안된 알고리즘의 변형으로 좀더 빠른 속도로 수렴하는 알고리즘을 제안하고자 한다.

1. 서 론

이동통신 시스템의 주파수는 한정된 무선 자원을 가지고 있으며, 한정된 무선자원의 효과적인 관리 방법 중에서 전력 제어의 연구는 중요시 되어왔다. 전력 제어를 효과적으로 수행함으로써 시스템 용량과 통화 품질을 향상시킬 수 있다. 결과적으로 한정된 주파수 대역내에서 동시에 통화할 수 있는 통화수를 늘리고 통신 시스템의 이점을 최대로 활용할 수 있다. 모든 이동국에 대한 송신전력 제어를 통하여 이동국 발신신호가 최소요구 수준의 반송파 대 간섭비(CIR, carrier to interference ratio)로 기지국에 수신된다면 시스템 용량을 최대화할 수 있다. 만일 이동국의 신호가 너무 약하게 수신된다면 이동국의 작동 성능이 저하되고, 이동국의 신호가 너무 강하게 수신된다면 그 이동국의 작동 성능은 향상되지만 이로 인하여 같은 채널을 사용 중인 다른 이동국에 대한 간섭이 증대되어 최대 수용량을 줄이지 않는 한 다른 가입자의 통화 품질이 수준 이하로 낮아진다. 그러므로 증가된 통화용량, 양질의 통화품질 및 기타 장점들을 얻기 위하여 통신 시스템은 순방향(기지국에서 이동국 방향) 및 역방향(이동국에서 기지국 방향) 전력 제어를 사용한다.

효과적인 전력 제어 알고리즘은 모든 링크들의 정보를 이용한 집중 전력 제어(Centralized Power Control, CPC)과 단지 하나의 링크만의 정보를 이용한 분산 전력 제어(Distributed Power Control, DPC), 반복법이나 비반복법에 따라 전력 제어 알고리즘을 분류할 수 있다. 전형적인 집중식 전력 제어 알고리즘은 [1-2]에서 연구되

2. 본 론

2.1 분산 전력 제어(Distributed Power Control)

본 논문에서는 이동통신에서 사용하는 역방향 전력 제어를 고려한다. 물론 순방향 전력제어에서도 동일하게 적용이 가능하지만 기지국과 통신하는 이동국들이 더욱더 적은 소비 전력과 QoS 사양을 가지므로 순방향 전력 제어에서 보다 역방향 전력 제어에서의 전력 제어가 중요하다.

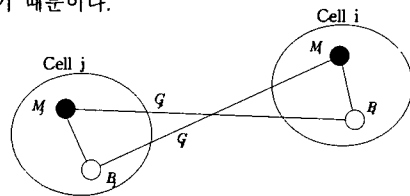


그림1. 링크 이득 모델

시스템 모델을 표현하기 위한 파라미터들에 대한 의미는 그림 1과 같고, 임의의 기지국(i)에서 M개의 이동국과 일반적 주파수 링크가 있다고 가정한다면, 기지국(i)에서 i번째 이동국의 CIR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_i = \frac{P_i G_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^M P_j G_{ij} + \nu_i}, \quad 1 \leq i \leq M. \quad (1)$$

여기에서 P_i 는 이동국의 전송 전력, G_{ii} 는 이동국과 기지국간의 이득이고, 수신국에서의 ν_i 는 수신잡음을 의미한다.

기지국에서 i 번째 이동국이 속해있는 기지국의 CIR은 식(1)에 의해 아래와 같이 다시 쓰여 질 수 있다.

$$\gamma_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^M h_{ij} P_j + \eta_i}, \quad (2)$$

여기에서 $M \times M$ 행렬 $H = \{h_{ij}\}$ 는

$$h_{ij} = \begin{cases} \gamma^t \cdot \left(\frac{G_{ij}}{G_{ii}} \right) & \text{if } i \neq j, \\ 0 & \text{if } i = j. \end{cases} \quad (3)$$

, $\eta_i = \gamma^t \cdot \nu_i / G_{ii}$ 이고, γ^t 는 임의의 순간에서 M 개의 이동국이 동일채널을 할당 받았다고 하였을 때, 이동국 i 가 제한되어지는 SIR값이다.

$$\frac{P_i}{\sum_{j=1}^M h_{ij} P_j + \eta_i} = \gamma^t \quad (4)$$

만약 $\gamma_i \geq \gamma, i = 1, \dots, M$ 하기 위한 전력 벡터가 존재한다면, γ 를 성취가능(achievable)하다고 말하고, 최대 성취가능 CIR γ^* 는 아래와 같이 정의한다.

$$\gamma^* = \max_{P \geq 0} \{ \min_{1 \leq i \leq M} \gamma_i \}, \quad (5)$$

여기에서 P 는 i 번째 요소 P_i 의 M 차원 전력벡터, $P \geq 0$ 는 P 의 성분이 음수가 아닌 양수라는 표시이다. 간섭이 제한된 시스템(수신잡음이 0일때)에서 최적 전력 벡터 P^* 는 γ^* 에서 존재한다.[6],[7]. 최적 벡터 P^* 는 유일한 값이고, 동일한 CIR(즉, $\gamma_i = \gamma^*, 1 \leq i \leq M$)을 가지는 모든 링크에 의해 나타난다. 행렬 H 의 최대 고유값 λ^* 는 $\gamma_i = 1/\lambda^*$ 의 관계가 있다[8]. 최적 전력 벡터 P^* 는 λ^* 를 고려한 H 행렬의 고유벡터의 값이다. 이산시간 순간에서 채널 상에 있는 각각의 M 이동국들은 자신의 전송전력동기를 조절한다. 이때 전력조절은 $n+1$ 번째 순간에서 i 번째 이동국의 전력조절은 아래의 수식에 의해 이루어 진다.

$$P_i^{(n+1)} = \frac{\gamma_i^t}{\gamma_i^{(n)}} P_i^{(n)}, \quad 1 \leq i \leq M, n \geq 0, \quad (6)$$

여기에서 $P_i^{(n+1)}$ 은 $n+1$ 번째 순간에서 i 번째 이동국의 전송 전력이고, $\gamma_i^{(n)}$ 은 CIR의 결과 값이고 γ^t 는 목표 CIR값이다. 이를 분산 전력 제어(Distributed Power Control, DPC)라 한다.

2.2 지수함수를 이용한 전력제어 알고리즘

(Exp-SIM)

식(5)의 분산 전력 제어 알고리즘의 좀더 빠른 수렴속도를 제안하는 Exp-DPC 알고리즘이 [5]에서 제안되었다. 이에 대한 알고리즘은 아래와 같다.

$$P_i^{(n+1)} = \exp(k \cdot \frac{\gamma_i^t}{\gamma_i^{(n)}}) P_i^{(n)}, \quad 1 \leq i \leq M, n \geq 0 \quad (7)$$

여기에서 k 는 임의의 양수이고, k 의 최적화에 의해서 수렴속도가 최적화 된다.

본 논문에서는 [9]에서의 SIM(Semi-Iterative Methods)을 식(5)에 적용하여 더욱 빠른 전력 제어 알고리즘(Exp-SIM)을 제안하고자 한다. Semi-Iterative Methods는 아래와 같다.

$$P^{(n+1)} = w \cdot \frac{\gamma^t}{\gamma^{(n)}} P^{(n)} + (1-w) P^{(n-1)}, \quad n \geq 1 \quad (8)$$

여기에서 $w = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \rho^2(h_{ij})}}$ 이고, ρ 는 고유값이

다.

식 (8)의 반복법에서 h_{ij} 의 고유값을 $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ 라 하고, $\rho(h_{ij}) = \max_k |\alpha_k|$ 로 정의하자. 이때의 일정한 $\rho(h_{ij})$ 를 스펙트럴 반지름(spectral radius)이라 부른다.

오류 벡터 $\epsilon^{(n)}$ 를 아래와 같이 정의하면

$$\epsilon^{(n)} = P^{(n)} - P^*, \quad n = 0, 1, \dots \quad (9)$$

오류 벡터 $\epsilon^{(n)}$ 는

$$\epsilon^{(n)} = h_{ij} \cdot \epsilon^{(n-1)}, \dots = (h_{ij})^n \cdot \epsilon^{(0)}. \quad (10)$$

로 표현할 수 있다. 실행가능 시스템(feasible system)의 오류 벡터는 $\epsilon^{(0)}$ 가 0이 되기 위한 필요충분 조건은 스펙트럴 반지름 $\rho(h_{ij})$ 가 1보다 작아야한다.[9]

수렴 비를 알아보기 위해 유클리디안 놈(Euclidean norm)을 이용하면, 식(10)으로부터 아래와 같은 부등식이 성립된다.

$$\| \epsilon^{(n)} \| = \| h_{ij} \cdot \epsilon^{(0)} \| \leq \| (h_{ij})^n \| \cdot \| \epsilon^{(0)} \|, \quad n = 0, 1, \dots \quad (11)$$

접근적 수렴 평균비([9])는

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \| (h_{ij}) \|^{1/n} = \rho(h_{ij}) < 1 \quad (12)$$

와 같이 정의 되고, 스펙트럴 반지름의 값이 작을수록 반복법에 의한 방법은 P^* 로 빠르게 수렴한다.

위의 식(7)에 식(6)을 적용하면 식(13)과 같은 지수함수를 이용한 SIM 전력 제어 알고리즘이 형성된다. 식 (13)에서 만약 w 의 값이 1이면 식 (6)의 지수함수를 이용한 DPC와 동일한 알고리즘이 실행되고, 식 (13)이 수렴되기 위한 w 값의 범위는 $0 \leq w < 2$ 이다.

$$P^{(n+1)} = w \cdot \exp\left(k \cdot \frac{\gamma^t}{\gamma_i^{(n)}}\right) P^{(n)} + (1-w) P^{(n-1)}, n \geq 1 \quad (13)$$

2.3 모의 실험

본 논문에서 제안된 알고리즘의 성능 비교를 위해 확산 대역폭 5MHz, 전송 비 8kbs인 WCDMA 환경에서 그림 2와 같이 19개의 이상적인 육각형 셀을 구성하였다. 이때 기지국은 각 셀의 중앙에 위치한다고 가정한다. 기지국 간의 거리는 1km로 구성되고, 임의의 전력 제어 측정 시점에서 각 사용자는 전체 19개 셀상에서 각 기지국에 10개의 균일 분포로 생성되어 위치한다.

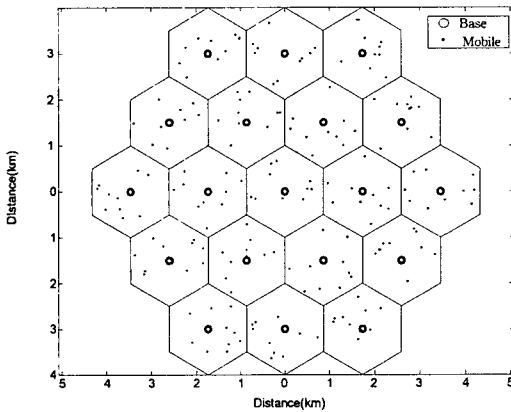


그림2 이동국과 기지국 분포도

링크이득은 $g_{ij} = s_{ij} \cdot d_{ij}^{-4}$ 으로써 s_{ij} 는 음영 페이딩 (shadow fading)이고 d_{ij} 는 사용자 i 와 기지국 j 사이의 거리이다. s_{ij} 는 평균 0, 표준편차가 8dB인 로그 노말 분포(log-normalized distribution)로써 각 사용자에게 대해 동일한 특성을 가진 독립적인 분포(i.i.d)로 가정한다. 기지국에서 수신 잡음은 -150dB, 모든 이동국에서 목표 에너지 비트 대 간섭 밀도 비(E_b/I_0)는 8dB로 가정한다. 위와 같은 환경에서 각 이동국의 초기 전력은 간격 (0, 1]에서 무작위 선택하였고, k 의 값은 실험결과 0.25가 최적의 값이었다. 실험의 측정된 값은 누설 확률 (outage probability)을 이용하여 나타내었다.

그림 3은 반복함수로서 각 알고리즘의 누설 확률을 나타낸다. 그림 3에서와 같이 지수함수를 이용한 DPC의 수렴속도를 보면 반복수가 20번째에서 0으로 수렴함을 볼 수 있고 지수함수를 이용한 SIM은 반복수가 13번째에서 수렴됨을 알 수 있다. 즉 지수함수를 이용한 SIM이 지수함수를 이용한 DPC보다 반복수가 더 짧은 순간에서 수렴함을 알 수 있다.

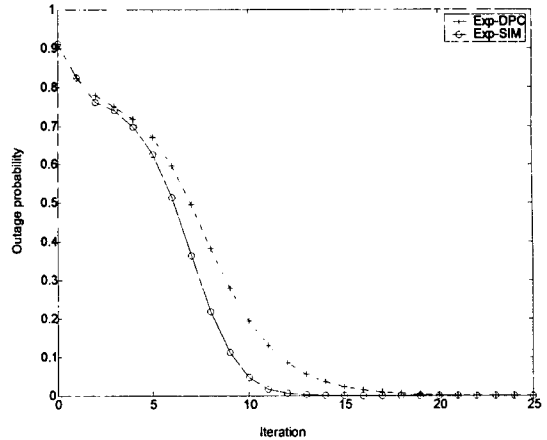


그림3. 누설 확률

3. 결 론

본 논문에서는 [5]에서 제안된 지수함수를 이용한 DPC보다 빠른 수렴속도를 가진 지수함수를 이용한 SIM을 제안하였다. 그리고 임의의 수인 k 값이 수렴속도에 영향을 미침을 알 수 있었다. 본 실험은 이상적인 환경에서의 실험이었다. 그러나 전력 갱신을 위한 연속된 반복 시간을 짧은 기간으로 간주하고 각 연산에서의 총 간섭이 동일하다고 가정했지만, 실제 채널 환경이 급변하는 시스템에서는 적절치 못하므로 이를 보상하는 알고리즘 적용이 추후 연구 과제로 진행되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. A. Grandhi, R. Vijayan, D.J. Goodman and J. Zander, "Centralized Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 42, no. 4, pp. 466-468, Nov. 1993.
- [2] J. Zander, "Performance of Optimal Transmitter Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE Trans. Comm., vol. 40, no. 1, pp. 57-62, Feb. 1992.
- [3] S. A. Grandhi, Rajiv Vijayan, and David J. Goodman, "Distributed Power Control for Cellular Radio Systems," IEEE Trans. Comm., vol. 42, no. 2, pp. 226-228, Feb. 1994.
- [4] G. J. Foschini and Z. Miljanic, "A Simple Distributed Autonomous Power Control Algorithm and its Convergence," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 42, pp. 641-646, Nov. 1993.
- [5] Ling Lv, Shihua Zhu, and Yonggang Wang, "A Distributed Power Control Algorithm for Wideband CDMA Cellular Mobile Systems," IEEE Technol. Pro. Conf., vol. 1, pp. 954-957, 2000.
- [6] J. Zander, "Performance of Optimum Transmitter Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE Trans. Technol., vol. 41, no.1, pp. 57-62, Feb. 1992.
- [7] J. Zander, "Distributed Cochannel Interference Control in Cellular Radio Systems," IEEE Trans. Technol., vol. 41, no. 3, pp. 305-311, Aug. 1992.
- [8] S. A. Grandhi, R. Vijayan, D.J. Goodman, and J. Zander, "Centralized Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE Trans. Technol., vol. 42, no. 4, pp. 466-468, Nov. 1993.
- [9] Richard S. Varga, "Matrix Iterative Analysis", Springer, 1999.