

# 빠른 채널 변화를 수반하는 CDMA 환경에서의 최적 전력 제어<sup>†</sup>

## Optimized Power Control for CDMA System under Fast Channel Variance

김형석\*, 변지영\*, 유관호\*\*  
(Hyung-Suck Kim, Ji-Young Byun, Kwan-Ho You)

**Abstract** - In this paper, we propose an optimal power control algorithm for CDMA cellular systems. The proposed power control algorithm is based on linear quadratic control theory. As the cellular system includes the changeability of system environment or various noise, Kalman filter is adapted to estimate the time-varying interference. This is the well-known linear quadratic Gaussian (LQG) theory. Through this algorithm, power transmission of each mobile with optimal one is more realistic. Simulation results show a fast convergence rate to optimal power value, and a rapid decreasing outage probability.

**Key Words** : optimal power control, CDMA, LQG, Kalman filter

### 1. 서론

CDMA 이동통신 시스템에서 전력제어 시 채널 용량과 통화 품질은 중요하게 고려될 요소이다. 특히 CDMA 시스템에서는 다수의 이동국들이 동일한 채널을 공유하므로 어느 한 이동국이 다른 이동국에게 불필요하게 영향을 주어 통화 품질을 떨어뜨리거나 채널 용량을 필요 이상으로 차지하여 통화 연결에 지장을 줄 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위해서 CDMA 시스템에서 최적의 전력제어는 매우 중요하다. 그 외에 원근 문제(Near-far problem) 해결이나 각 이동국의 전력 소모를 최소화하여 배터리의 수명을 연장하는데 기여한다.

지금까지 많은 노력에 의해 다양한 전력제어 알고리즘이 개발되었다. 셀룰러 시스템에서 전력제어는 Zander[1]나 Vijayan에 의해서 주목할 만한 발전을 이루었으며 Foschini[2]에 의해 전력제어의 중요한 틀이 된 분산전력제어(Distributed Power Control) 알고리즘이 제안되었다. DPC 알고리즘은 기존 알고리즘에서 사용한 모델 보다 일반화된 시스템 모델을 통해 각 이동국의 통화 연결을 유지할 수 있도록 전송전력을 제어한다. Grandhi[3]는 DPC의 단점을 보완하여 각 이동국의 제한된 최대 전송 전력을 고려한 제한된 분산전력제어(Distributed Constrained Power Control) 알고리즘을 제안하였으며, Jantti와 Kim은 Successive Overrelaxation Iterative Method를 사용

하여 DPC 알고리즘에 비해 이론적으로 빠른 수렴 속도를 갖는 제한된 2차 분산전력제어(Second Order Constrained Power Control) 알고리즘을 제안했다[4]. El-Osery와 Abdallah[5]는 전력제어에 현대제어이론을 적용하여, 상태 공간 방정식으로 시스템 모델을 표현하고, LQ(Linear Quadratic)제어 기법으로 제어를 설계하여 기존의 알고리즘 보다 수렴 속도가 빠른 알고리즘을 제시하였다.

본 논문에서는 각 이동국이 송신하는데 필요한 최적의 전력에 빠르게 수렴하는 것뿐만 아니라, 실제로 CDMA 시스템 환경에 영향을 줄 수 있는 다양한 잡음이나 페이딩 효과 등을 고려하여, 보다 강인한 전력제어 방법을 제안한다. 제안된 전력제어는 CDMA 시스템 상 상태 공간 방정식으로 모델링하고 LQ 이론에 Kalman 필터를 혼합한 LQG(Linear Quadratic Gaussian) 이론을 적용하여, DCPC 알고리즘과의 성능 비교를 통해 보다 빠른 수렴 속도와 잡음환경에서도 최적의 전력전송 상태가 유지되는 것을 증명한다.

### 2. 분산 전력 제어

CDMA 셀룰러 시스템에서 동일 채널 내에 N개의 이동국이 있으며, 역방향 전력제어에 관해 생각한다.  $\gamma_i$ 는 기지국과 이동국간의 통화 연결을 위해 주어진 최소 SIR이라고 가정하자. N개의 이동국 중 하나인 i 번째 이동국의 SIR 식은 다음과 같다.

$$\gamma_i = \frac{g_n P_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^N (g_j P_j + n_i)}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

저자 소개

\* 學生會員: 成均館大學 電子電氣工學科 碩士課程

\*\* 正會員: 成均館大學 電子電氣工學科 副教授·工博

† 본 연구는 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.  
(KRF-2003-041-D002299)

여기서  $P_i$  는  $i$  번째 이동국의 송신전력이고  $n_i$  는 수신 잡음이다.  $\gamma_i$  는  $i$  번째 이동국의 SIR이며,  $g_{ij}$  는  $j$  번째 이동국과  $i$  번째 기지국 사이의 전달이득이다. 식 (1)에서 최소의 전력으로 통화 연결을 이루기 위해서  $\gamma_i = \gamma^*$  이라고 가정하고 행렬  $H$  를 다음과 같이 정의하자.

$$H = [h_{ij}], \quad \text{여기서 } h_{ij} = \begin{cases} \frac{\gamma^* g_{ij}}{g_{ii}} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases}$$

$$\eta = \frac{\gamma^* n_i}{g_{ii}}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$H$  는  $N \times N$  행렬이고  $\eta$  는  $N \times 1$  행렬이다. 식 (2)의 행렬을 이용하여 다음과 같은 선형대수방정식을 유도할 수 있다.

$$AP = \eta, \quad A = (I - H)$$

$$P = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_N]^T \quad (3)$$

식 (3)을 Jacobi fixed-point iterations 방법으로 다음과 같은 최적의 전력값을 유도한 것이 Foschini가 제안한 DPC 알고리즘이다.

$$P(n+1) = \frac{\gamma^*}{\gamma_i(n)} p(n), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

식 (4)에서  $i$  번째 이동국의  $n$  번째 전력 값과 SIR 값으로 다음 단계의 전력 값을 알 수가 있다. 이동국의 최대전송전력은 한계가 있으므로 다음과 같이 전력을 제한할 수 있다.

$$0 \leq P \leq P_{\max} \quad (5)$$

전송전력제한을 DPC 알고리즘에 다음과 같이 확장할 수 있는데 이 알고리즘이 DCPC 알고리즘이다.

$$P(n+1) = \min \left\{ \frac{\gamma^*}{\gamma_i(n)} p(n), P_{\max} \right\} \quad (6)$$

### 3. Linear Quadratic 전력제어

LQ 제어이론을 적용하기 위해 전력제어 문제를 상태방정식으로 나타낸다. 먼저, 전력제어와 관련된 시스템 상태를 정의하는 것이 필요한데, 본 논문에서는 두 개의 상태 변수를 선택한다. 하나는 전송전력 오차  $e_i(n) = p_i(n) - P_i$  가 측정된  $\xi_i$  이고 다른 하나는 각 이동국의 전송 전력  $P_i$  이다. 새로운 상태변수  $\xi_i$  와  $P_i$  로 다음과 같이 식을 정의할 수 있다.

$$\xi_i(n+1) = \xi_i(n) + e_i(n)$$

$$P_i(n+1) = P_i(n) + u_i(n) \quad (7)$$

여기서,  $u_i(n)$  은 제어 입력으로 전력 변화량이다.  $x_i(n)$  을  $x_i(n) = [\xi_i(n), P_i(n)]^T, i = 1, 2, \dots, N$  으로 정의하므로 식(7)은 다음과 같이 2차의 불연속 선형시스템으로 나타낼 수 있다.

$$x_i(n+1) = Ax_i(n) + Bu_i(n)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

이후로 표기를 간단히 하기 위해서 상태방정식의 첨자  $i$  를 생략한다.

최적의 입력  $u$  를 구하기 위해 다음과 같이 목적함수를 선택한다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^N \{x^T(n)Qx(n) + u^T(n)Ru(n)\}, \quad Q \geq 0, R > 0 \quad (11)$$

여기서  $Q$  와  $R$  은 대칭 행렬이다. 여기서의 목적은 각 이동국이 최적의 전송전력에 빠르게 수렴하도록 제어기를 설계하는 것이다. 이 제어기는 셀룰러 시스템에 목적함수  $J$  를 최소화하는 제어입력  $u$  를 갖게 한다. LQR 문제를 풀기 위해서 다음과 같이 Hamiltonian 함수를 정의한다.

$$H = \frac{1}{2} \{x^T(n)Qx(n) + u^T(n)Ru(n)\} + \lambda^T(n+1)\{Ax(n) + Bu(n)\} \quad (12)$$

Hamiltonian 함수의 필요조건으로 다음과 같이 costate equation과 stationarity condition을 설정한다.

$$\lambda(n) = \frac{\partial H}{\partial x(n)} = Qx(n) + A^T \lambda(n+1)$$

$$0 = \frac{\partial H}{\partial u(n)} = Ru(n) + B^T \lambda(n+1) \quad (13)$$

위 조건에 의해 상태궤환 제어입력을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$u(n) = -Kx(n) \quad (14)$$

여기서  $K = (R + B^T S B)^{-1} B^T S A$  로부터 구해지며,  $S > 0$  일때  $S$  는 안정 상태에서 다음 Riccati식의 유일한 해이다.

$$A^T S A - S + Q - A^T S B (R + B^T S B)^{-1} B^T S A = 0 \quad (15)$$

따라서 다음 반복의 전송전력은 다음과 같다.

$$p(n+1) = \min \{p(n) + u(n), P_{\max}\} \quad (16)$$

그리고 각 반복에서의 SIR값은 식(1)에서 구할 수 있다.

지금까지 최적의 전송전력에 도달하는 수렴 속도를 향상시키기 위해서 LQR 이론을 적용하였다. 실제 CDMA 시스템에서는 페이딩 효과나 그 외 잡음에 의해 채널의 변화가 야기된다. 이런 시스템 환경의 다변성을 고려하기 위해 모든 요소를 상태변수로 설정해서 계산하는 것은 불가능하다. 그래서 본 논문에서는 실제 시스템에 적용될 수 있는 다른 전력제어기법을 제안한다. Kalman 필터를 상태변수의 관측기로 LQR 제어기법에 적용한다.

아래와 같이 원래 시스템 상태방정식에 잡음을 첨가한다.

$$x(n+1) = Ax(n) + Bu(n) + Gw(n)$$

$$y(n) = Cx(n) + v(n) \quad (17)$$

$w(n)$  은 프로세스 잡음으로 페이딩 효과에 의한 것이고  $v(n)$  은 측정 잡음으로 측정 오차에 의한 것이다. 선형 Kalman 필터 이론에 의해 사전 추정자  $\bar{x}(n)$  와 사후 추정자  $\hat{x}(n)$  는 다음과 같다.

$$\hat{x}(n) = \bar{x}(n) + L[y(n) - C\bar{x}(n)]$$

$$\bar{x}(n+1) = A\bar{x}(n) + Bu(n) \quad (18)$$

여기서 Kalman 필터 이득은  $L = ASC^T(CSC^T + V)^{-1}$  와 같이 구해진다.

$S > 0$  일때  $S$  는 다음과 같은 Riccati식의 안정상태에서의 유일한 해를 의미한다.

$$A^T S A - S + W - A S C^T (V + C S C^T)^{-1} C S A^T = 0 \quad (19)$$

이때 제어 입력은 LQR 이론에서 구한 상태제환형태와 동일하다.

$$u(n) = -K \hat{x}(n) \quad (20)$$

#### 4. 시뮬레이션

여기서는 제한된 전력제어 방법과 DCPC 알고리즘을 동일 환경에서 모의 실험하여 비교하였다. 실험 환경은 일반적인 CDMA 시스템으로 인접한 19개의 육각 셀을 갖는다고 가정하였다. 기지국은 각 셀의 중앙에 위치하고 전 방향 안테나를 사용하였으며 그림 1과 같이 각 셀마다 10개의 이동국을 불규칙하게 분산시켰다.

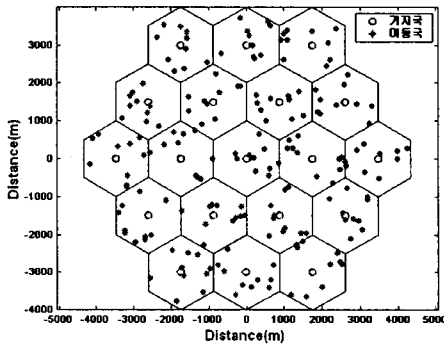


그림 1 : 19개의 기지국을 갖는 셀룰러 시스템

통신 비트율은 9600bps, 명령 SIR은 7dB이고 수신 잡음은  $10^{-2}W$ 이다. 연결 이득은  $G_b = A_b/d_b^\alpha$  이고 여기서  $d_b$  는 기지국과 이동국 사이의 거리를 나타내고  $\alpha$  는 4dB 로 하였다.  $A_b$  는 전파음영으로써 0-8dB 사이의 임의의 값을 갖는다. 목적 함수의 가중치 행렬은 다음과 같이 설정하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}, R = 0.1 \quad (21)$$

DCPC 알고리즘과 제한한 알고리즘을 비교하기 위해 랜덤한 프로세스 잡음을 DCPC 알고리즘에 동일하게 첨가하고 임의의 한 이동국을 선택했다. 그림 2 는 선택한 이동국의 매 슬롯 당 전력 변화를 나타내고 있으며, 그림 3은 그에 따른 SIR의 변화를 나타내고 있다. 선택한 이동국의 최적의 송신전력은 3.1153W 이고 목표 SIR은 7dB(5.0119W)이다. 그림 2 와 3을 통해서 제한한 알고리즘이 DCPC 보다 빠르게 최적의 송신전력 값에 수렴하는 것을 알 수 있으며, 그에 따른 목표 SIR 값에 도달하는 것을 쉽게 알 수 있다. 또한 DCPC 알고리즘의 경우 잡음에 대해 민감하게 반응하지만 제한된 알고리즘은 강인함을 모의실험을 통해서 입증하였다.

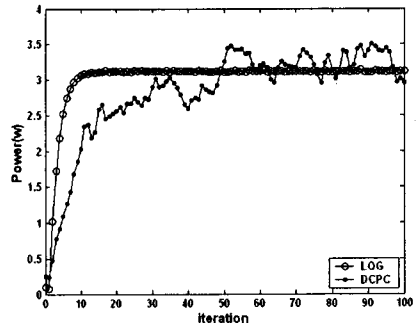


그림 2 : LQG 와 DCPC 알고리즘에 의한 전력변화

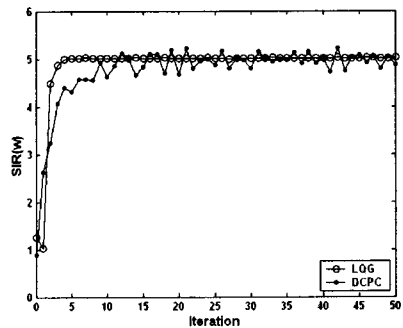


그림 3 : LQG 와 DCPC 알고리즘에 의한 SIR 변화

#### 4. 결 론

본 논문에서는 CDMA 시스템 환경에 영향을 줄 수 있는 잡음에 대해 강인하며 빠르게 수렴하는 새로운 전력제어 방법을 제시하였다. 먼저 새로운 상태변수를 제시하고 그에 따른 제어를 설계하였다. 설계된 제어를 통해서 목표 SIR 값을 잘 추종하였으며, 모의실험을 통해 DCPC 보다 제한된 알고리즘이 빠르게 수렴함을 증명하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Zander J., "Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems", IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 41, pp. 57-62, 1992.
- [2] Foschini G. J. and Miljanic Z., "A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence", IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 42, pp. 641-646, 1993.
- [3] Grandhi S. A., Zander J. and Yates R., "Constrained power control", Wireless Personal Communications, vol. 1, pp. 257-270, 1995.
- [4] Jantti Riku and Kim S. L., "Second-order power control with asymptotically fast convergence", IEEE Journal Sel. Areas Commun., vol. 18, pp. 447-457, 2000.
- [5] El-Osery Aly and Abdallah Chaouki, "Distributed power control in CDMA cellular systems", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 42, pp. 152-159, 2000.