

논문 2009-46TC-5-8

# SIR 기반의 셀룰러 무선망에서 전송 전력 제어 알고리즘의 성능 비교

(Performance Evaluation of Transmission Power Control Algorithms in  
SIR-based Cellular Wireless Networks)

정 보 환\*, 김 문 갑\*\*

(Bo-Hwan Jung and Moon-Gab Kim)

## 요 약

이 논문에서는 SIR 기반의 셀룰러 무선망에서 전송 전력 제어 알고리즘들의 성능을 수치실험을 통해 평가하였다. 이를 위해 SIR 기반의 연속 및 이산 시간 전송 전력 제어 알고리즘을 하나로 통합된 동적 상태 방정식으로 표현하였다. 수치실험은 연속성을 갖는 외란 환경 하에서 수행되었다. 수치실험 결과 본 논문에서 제안한 전송 전력 제어 알고리즘이 보다 우수한 외란 제거 성능을 명백히 보여 준다.

## Abstract

In this paper, we evaluate a performance on a transmission power control algorithm in a SIR-based wireless networks. We consider the existing iterative power control algorithms into a unified dynamic state system formulation in both continuous-time and discrete-time system. Numerical experiments are performed under the disturbance of sinusoidal. These results indicate that the proposed power control scheme has a performance improvement with a better disturbance elimination in wireless mobile systems.

**Keywords :** SIR, Power Control, IS-95, DPC, DRPC, Unified Approach.

## I. 서 론

무선 통신망에서 통신 서비스 품질 보장에 대한 다양한 사용자 요구와 네트워크 자원을 효율적으로 이용하기 위한 해결책으로 QoS (quality-of-services)가 최적의 대안으로 제안되어져 왔다. 이에 대한 사용자의 QoS 척도는 신호 대 간섭비 (SIR: signal-to-interference ratio)이다. 모든 사용자의 목표 SIR을 달성하기 위한 일반적인 방법은 네트워크 자원을 효과적으로 각각의

사용자에게 할당하는 것이다. 셀룰러 무선망에서의 자원할당은 채널할당, 대역폭, 전력제어 등을 포함한다. 이들 중 전력 제어는 무선 통신망의 설계에서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 사용자의 전송 전력을 적절히 제어함으로써 타 사용자에 미치는 간섭을 최소화 할 수 있으며 동시에 이동국의 배터리 수명을 연장 시킬 수 있다<sup>[1]</sup>.

SIR 기반의 초기 전력 제어 기법은 논문 [2]에 의해 제안되었다. 전력 제어 기법은 집중<sup>[3]</sup> 또는 분산<sup>[4~6]</sup> 방법으로 나누어진다. 집중 제어 기법은 사용자에 대한 모든 정보 즉, 네트워크에 참여하는 사용자의 모든 링크 이득을 이용하여 사용자에 대한 전력 제어를 결정한다. 이에 반해 분산 제어 방법은 각각의 사용자에 대한 전력 제어 결정은 단지 사용자 자신의 링크이득과 SIR 정보만을 이용한다. SIR은 사용자의 전송전력과 배경잡

\* 정희원, 용인송담대학 정보통신전공  
(Dept.of Information Communication at Yong-in Songdam College)

\*\* 정희원, 용인송담대학 디지털전자전공  
(Dept.of Digital Electronics at Yong-in Songdam College)

접수일자: 2009년2월3일, 수정완료일: 2009년4월15일

음으로 구성된 정적 비선형함수로 정의될 수 있다. 만약 사용자의 전송 전력을 셀룰러 무선망의 입력으로 고려한다면, 사용자의 SIR 값은 결국 셀룰러 무선망에 참여하는 사용자 전송전력에 대한 출력관계가 된다. 그러므로 SIR 기반의 전력 제어 문제는 제어 시스템의 관점에서 정적, 시변, 비선형, 다중입력-다중출력의 문제가 된다.

논문 [8]에서는 기존에 존재하는 SIR 기반의 전력 제어 알고리즘을 하나의 통합된 동적 제어 시스템으로 구성하는 방법을 다루었다. 본 논문에서는 이를 바탕으로 외란에 강한 전력 제어 기법을 제시한다. 수치실험은 연속성을 갖는 외란 환경 하에서 수행되었으며 수치실험 결과 본 논문에서 제안한 전력 제어 알고리즘이 보다 우수한 외란 제거 성능을 명백히 보여 준다.

## II. 본 론

무선 통신망에서의 전송 전력 제어에 대한 문제를 다루기 위해 여기서는 논문 [7]에서와 같이 로그 단위 및 선형 단위 ("bar"로 표시) 표현식을 도입한다. 사용자  $i$ 에 대한 신호 대 간섭비 (SIR)은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_i(t) &= \frac{\bar{g}_{ii}(t)\bar{p}_i(t)}{\bar{I}_i(t)} \\ &= \frac{\bar{g}_{ii}(t)\bar{p}_i(t)}{\sum_{j \neq i}^M \bar{g}_{ij}(t)\bar{p}_j(t) + \bar{\nu}_i(t)}, \quad i = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\bar{I}_i(t)$ 는 사용자  $i$ 를 제외한 모든 사용자로부터의 간섭을 나타내며  $\bar{g}_{ij}(t)$ 는 사용자  $i$ 가 할당된 기지국과 사용자  $j$  사이의 링크 이득을 나타낸다. 사용자  $i$ 의 전송 전력  $\bar{p}_i(t)$ 는 무선 통신망의 입력 그리고 사용자  $i$ 의 SIR,  $\bar{\gamma}_i(t)$ 는 통신망으로부터 사용자로의 출력으로 각각 고려한다.  $M$ 은 무선 통신망에 접속하는 모든 사용자들의 수이다.  $\bar{\nu}_i(t)$ 는 사용자  $i$ 의 배경잡음이다.

사용자  $i$ 에 대한 전력 제어 목적은 목표 SIR ( $\gamma_i^{tar}$ )를 달성하기 위해 적절한 송신 전력을 발생시키는 것이다. 즉,

$$\bar{\gamma}_i(t) \geq \bar{\gamma}_i^{tar}(t) \quad (2)$$

또는

$$\bar{\gamma}_i^{tar}(t) \leq \frac{\bar{g}_{ii}(t)\bar{p}_i(t)}{\sum_{j \neq i}^M \bar{g}_{ij}(t)\bar{p}_j(t) + \bar{\nu}_i(t)}, \quad i = 1, \dots, M. \quad (3)$$

현재의 무선 통신망은 IS-95 또는 CDMA2000 표준화를 따르며, 사용자  $i$ 에 대한 전력 전송은 아래와 같이 수행된다.

$$\begin{aligned} p_i(k+1) &= p_i(k) - \Delta \operatorname{sgn}(\gamma_i(k) - \gamma_i^{tar}), \quad \Delta = 1dB. \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)는 로그 단위로 표현된 식이며 이를 선형으로 표현하면 아래와 같다.

$$\bar{p}_i(k+1) = \begin{cases} K\bar{p}_i(k), & \bar{\gamma}_i(t) < \bar{\gamma}_i^{tar} \\ (1/K)\bar{p}_i(k), & \bar{\gamma}_i(t) > \bar{\gamma}_i^{tar} \end{cases} \quad (5)$$

전력 제어 수행에 대한 여러 가지 알고리즘들이 제안되었다. 가장 많이 알려진 방법은 분산 전력 제어 (DPC: Distributed Power Control) 알고리즘<sup>[3]</sup>이며 아래와 같이 표현된다.

$$p_i(k+1) = \frac{\gamma_i^{tar}}{\gamma_i(k)} p_i(k), \quad i = 1, \dots, M. \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)의 주요한 차이는 이득을 갱신하는 파라미터이다. IS-95 표준에서 이동국 전력의 요소는  $K$  또는  $1/K$ 로 고정되어 있다. 사용자  $i$ 의 신호 대 간섭비가 목표 값에 도달한다면 이동국 전력은 최적의 전력 값 근처에서 채터링 (chattering) 현상을 나타낸다. 이와 반대로 DPC의 전력 요소는 현재의 신호 대 간섭비에 반비례한다. 이동국의 전송전력은 점근적으로 원하는 값으로 접근한다. 따라서 SIR이 목표 값으로 접근할 때 점근적인 추적 성능을 나타낸다.

## III. 연속 및 이산 시간에서의 동적 시스템 표현

여기에서는 논문 [8]에서 전송 전력 제어 문제를 연속 및 이산 시간 동적 표현식으로 재구성한 문제를 간단히 기술한다. 첫째, 전력 제어 알고리즘 (6)을 로그 단위로 표현하면 다음과 같다.

$$p_i(k+1) = p_i(k) + \gamma_i^{tar} - \gamma_i(k). \quad (7)$$

연속 시간 미분 방정식을 얻기 위해 아래와 같은 전방향

차분 근사화를 이용한다.

$$\left. \frac{dp_i(t)}{dt} \right|_{t=kT} \approx \frac{p_i((k+1)T) - p_i(kT)}{T}, \quad (8)$$

여기서  $T$ 는 표본화 주기이며  $kT$ 는  $k$ 번째 샘플링 순간이다. 따라서 IS-95 (4)와 DPC (7)의 로그 단위 연속 시간 미분 방정식은 다음과 같이 각각 표현된다.

$$\dot{p}_i(t) = \frac{\Delta}{T} \text{sgn}(\gamma_i^{tar} - \gamma_i(t)), \quad (9)$$

그리고

$$\dot{\gamma}_i(t) = \frac{1}{T} \text{sgn}(\gamma_i^{tar} - \gamma_i(t)). \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)의 전력 제어 알고리즘은 1차 미분 방정식 형식을 나타내며 아래와 같은 제어 법칙으로 표현된다.

$$\dot{p}(t) = u(t). \quad (11)$$

사용되는 제어 법칙에 대한 명백한 이해를 위해 SIR의 정의, 식 (1)을 로그 단위로 아래와 같이 표현한다.

$$\gamma_i(t) = g_{ii}(t) + p_i(t) - L_i(t). \quad (12)$$

표본화 주기 내에서 링크 이득과 간섭은 일정하다고 가정하면 식 (12)의 미분은 다음과 같이 근사화된다.

$$\dot{\gamma}_i(t) \approx \dot{p}(t). \quad (13)$$

신호 대 간섭비로써 식 (9)와 식 (10)을 표현하면 아래와 같다.

$$\dot{\gamma}_i(t) = \frac{\Delta}{T} \text{sgn}(\gamma_i^{tar} - \gamma_i(t)), \quad (14)$$

그리고

$$\dot{\gamma}_i(t) = \frac{1}{T} \text{sgn}(\gamma_i^{tar} - \gamma_i(t)). \quad (15)$$

오차 변수를 다음과 같이 정의한다면

$$e_i(t) = \gamma_i^{tar} - \gamma_i(t). \quad (16)$$

식 (14)와 식 (15)은 다음과 같은 오차 방정식으로 표현된다.

$$\dot{e}_i(t) = \frac{\Delta}{T} \text{sgn}(e_i(t)), \quad (17)$$

그리고

$$\dot{e}_i(t) = \frac{1}{T} \text{sgn}(e_i(t)). \quad (18)$$

제어 이론의 관점에서 전송 전력 갱신을 위해 IS-95는 슬라이딩 모드 제어 법칙을 사용하며 DPC 알고리즘은 선형 상태 피드백 제어 법칙을 사용함을 알 수 있다.

### 3.1 전송 전력 제어 알고리즘

여기에서는 새롭게 제안하는 외란에 강인한 전송 전력 제어 (Disturbance Rejection Power Control : DRPC) 알고리즘을 살펴본다. 먼저, 연속 시간 제어 방법들을 적용하기 위해 식 (11)과 식 (12)를 상태 방정식과 측정 방정식으로 각각 아래와 같이 표현한다.

$$\dot{p}_i(t) = u_i(t), \quad i = 1, \dots, M. \quad (19)$$

$$\gamma_i(t) = p_i(t) + d_i(t), \quad i = 1, \dots, M. \quad (20)$$

여기서  $d_i(t)$ 는 링크 이득  $g_{ii}(t)$ , 변이와 간섭  $L_i(t)$ 에 기인한다. 식 (19)과 식 (20)을 전방향 미분 근사화를 통해 이산 시간 방정식과 제어 입력은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$p_i(k+1) = p_i(k) + u_i(k)T. \quad (21)$$

$$\gamma_i(k+1) = \gamma_i(k) + u_i(k)T + d_i(k). \quad (22)$$

$$\begin{aligned} u_i(k) &= \frac{1}{T}(\gamma_i^{tar} - \gamma_i(k) - d_i(k)) \\ &= \frac{1}{T}(e_i(k) - d_i(k)). \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 외부 외란,  $d_i(k)$ ,은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_i(k) &= \int_{kT}^{(k+1)T} \dot{d}_i(t) dt \\ &= d_i((k+1)T) - d_i(kT). \end{aligned} \quad (24)$$

표본화 시간  $t = kT$ 에서 외란은  $kT < t \leq (k+1)T$ 에 포함된 것이므로 제어 입력으로 사용할 수 가 없다. 그러나 외란이 어떤 연속성을 나타낸다면 아래와 같은 근사를 통해 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_i(k) &\approx d_i(k-1) \\ &= -e_i(k) + e_i(k-1) - u_i(k-1)T. \end{aligned} \quad (25)$$

#### IV. 수치실험

실험에서 고려하는 기존의 제어 법칙은 IS-95와 DPC이다. 전력 제어 법칙의 성능을 평가하기 위해 아래와 같은 수치 실험 환경을 고려하였다.

- 1) 중앙 셀을 중심으로 7개로 구성된 육각형 셀을 고려하며 셀 당 사용자는 1명이다.
- 2) 사용자의 위치는 직경 2 km인 셀 내에서 균등하게 분포한다.
- 3) 배경 잡음 전력은 -110 dBm 이다.
- 4) 링크이득은  $d_{ij}^{-4}$ 와 연속성을 가진 외란 (disturbance of sinusoidal)으로 구성된다.
- 5) 목표 SIR 값은 7 dB 이다.

그림 1은 7개의 셀로 구성된 환경을 보여 준다. 셀 내에서 사용자 코드 사이의 통계적 특성을 단순히 하기 위해 사용자를 1명으로 가정한다. 위와 같은 실험 환경 하에서 먼저 각각의 알고리즘에 의한 사용자의 전송 전력을 살펴본다. 또한, 각각의 알고리즘에 대응하는 모든 사용자에게 대한 평균 신호 대 간섭비를 비교한다.

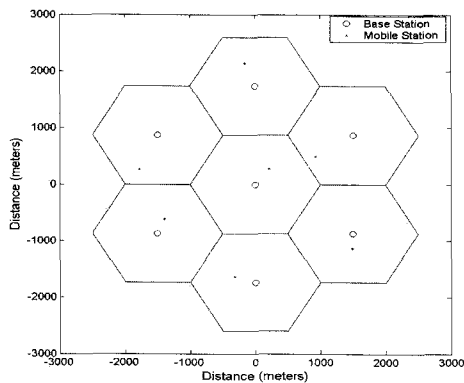


그림 1. 7 셀 구조  
Fig. 1. 7-cell hexagonal.

##### 가. 전송 전력 비교

그림 2, 그림 3 그리고 그림 4는 IS-95, DPC 그리고 여기서 제안한 전송 전력 알고리즘 DRPC에 대한 사용자의 전송 전력을 각각 보여 준다. 비교 대상의 사용자 중 사용자 5는 다른 두 사용자에 비해 상대적으로 기지국에 가까이 위치함으로 전송 전력이 가장 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 반면 사용자 3은 비교 대상 사용자 중 가장 멀리 위치함으로 목표 SIR 값을 유지하기 위해

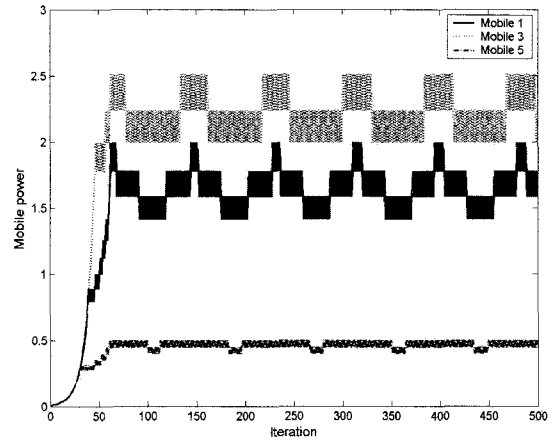


그림 2. IS-95의 전송 전력  
Fig. 2. Transmission power of IS-95.

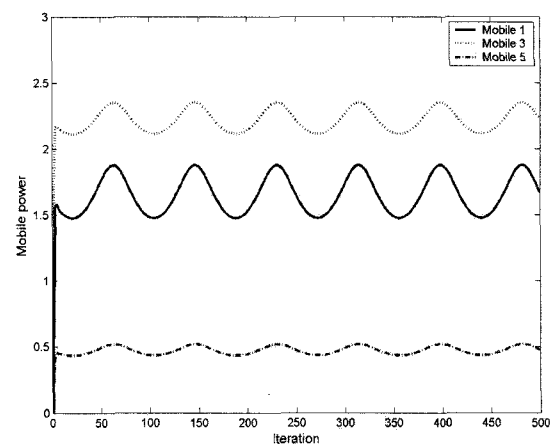


그림 3. DPC 알고리즘의 전송 전력  
Fig. 3. Transmission power of DPC.

상대적으로 많은 전송 전력을 필요로 함을 알 수 있다. 여기서 고려되는 3 가지 알고리즘 모두 외부 외란에 대응하기 위해 이동국의 전송 전력은 링크 이득의 크기에 반비례하는 전력 값을 가짐을 알 수 있다. 그러나 IS-95의 전송 전력은 제어의 관점에서 보다 비효율적인 스위칭 현상을 보여 준다. 표 1은 DPC와 제안한 DRPC 알고리즘의 전송 전력 값이 거의 동일하다는 것을 나타낸다.

##### 나. 신호 대 간섭비 (SIR)의 비교

수치실험을 통한 3 가지 알고리즘의 성능 비교를 위해 여기서는 모든 사용자를 고려한 평균 신호 대 간섭비를 성능 평가 지수로 이용한다. 첫째, 그림 5는 IS-95 기법을 이용한 모든 사용자에게 대한 평균 SIR 값을 보여

표 1. 정상상태에서의 사용자의 전송 전력

Table 1. Transmission power at steady state.

	전송 전력		
	IS-95 알고리즘	DPC 알고리즘	DRPC 알고리즘
사용자 1	1.9953 ~ 1.4125	1.8745 ~ 1.4757	1.8767 ~ 1.4797
사용자 3	2.5119 ~ 1.9953	2.3494 ~ 2.1127	2.3508 ~ 2.1122
사용자 5	0.5012 ~ 0.3981	0.5182 ~ 0.4342	0.5187 ~ 0.4340

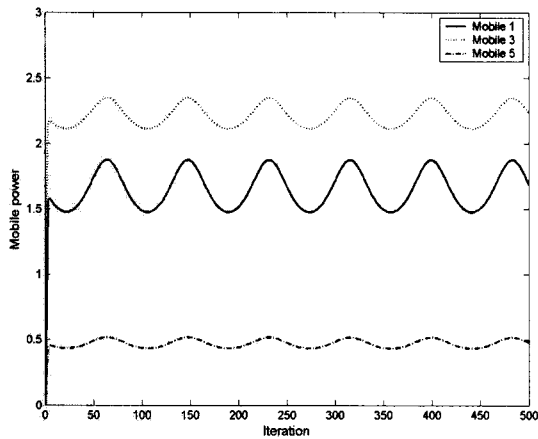


그림 4. DRPC 알고리즘의 전송 전력  
Fig. 4. Transmission power of DRPC.

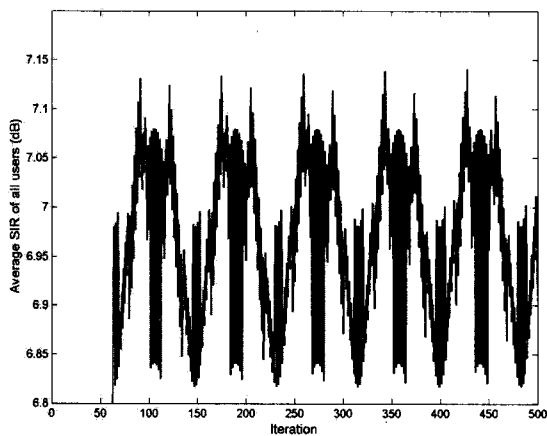


그림 5. IS-95의 평균 SIR  
Fig. 5. Average SIR of IS-95.

준다. IS-95는 앞에서 살펴본 것처럼 제어의 관점에서 슬라이딩 모드 기법과 동일하다. 따라서 IS-95 전송 전력 제어 알고리즘은 그림 5의 결과와 같이 채터링

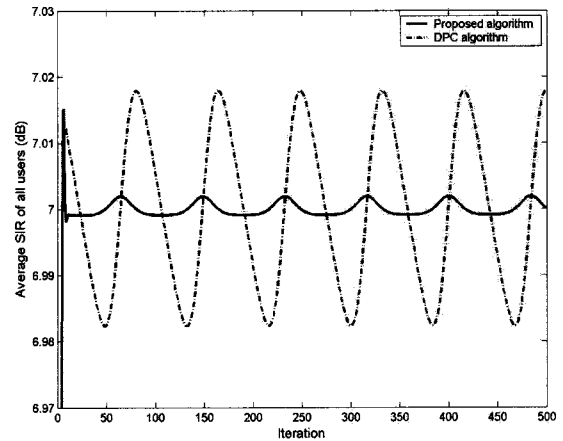


그림 6. DPC와 DRPC의 평균 SIR  
Fig. 6. Average SIR of DPC and DRPC.

(chattering)의 경향을 보여준다. 그림 6은 여기서 제안한 전송 전력 제어 알고리즘 DRPC와 DPC 알고리즘을 이용한 모든 사용자를 고려한 평균 SIR 값을 나타낸다. DPC 알고리즘은 단지 현재의 오차에 비례하는 전송 전력을 결정한다. 이에 반해 여기서 제안하는 DRPC 알고리즘은 이전 오차와 현재의 오차를 이용하여 식 (25)와 같이 외란의 값을 예측할 수 있으므로 표 1과 같이 거의 동일한 전송 전력을 유지하면서도 DPC 알고리즘에 비해 보다 뛰어난 외란 제거 성능을 가진다.

### V. 결론

본 논문에서는 셀룰러 무선망의 대표적인 전송 전력 제어 알고리즘 (IS-95, DPC)과 여기서 제안한 DRPC 알고리즘에 대해 수치실험을 통한 성능 평가를 수행했다. 이를 위해 첫째, 기존에 존재하는 SIR 기반의 연속 및 이산 시간 전력 제어 알고리즘을 하나의 통합된 동적 상태 방정식으로 표현하였다. 수치실험은 연속성을 갖는 외란 환경 하에서 수행되었다. 연속성을 갖는 외란인 경우 이전의 오차 정보와 현재의 오차 정보 등을 이용하여 외란을 추정할 수 있다. 수치실험을 통해 본 논문에서 제안한 전송 전력 제어 알고리즘이 보다 우수한 외란 제거 성능을 명백히 보여 주었다.

### 참고 문헌

[1] L. Qian and Z. Gajic, "Optimal Distributed Power Control in Cellular Wireless Systems,"

Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems Series B, vol. 10, pp. 537-559, 2003.

- [2] J. Zander, "Performance of Optimum Transmitter Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE Trans. on Vehicular Tech., vol. 41, pp. 57-62, Feb. 1992.
- [3] S. Grandhi, R. Vijayan, D. Goodman and J. Zander, "Centralized Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE Trans. on Vehicular Tech., vol 42. no. 4, pp. 466-468, Nov. 1993.
- [4] S. Grandhi, R. Vijayan and D. Goodman, "Distributed Power Control in Cellular Radio Systems," IEEE Trans. on Comm., vol 42. no. 2/3/4, pp. 226-228, Feb/Mar/Apr. 1994.
- [5] G. J. Foschini and Z. Miljanic, "A Simple Distributed Autonomous Power Control Algorithm and its Convergence," IEEE Trans. on Vehicular Tech., vol. 42, no. 4, pp. 641-646, Nov. 1993.
- [6] A. El-Osery and C. Abdallah, "Distributed Power Control in CDMA Cellular Systems," IEEE Antennas and Propagation Mag., vol. 42, No. 4, pp. 152-159, Aug. 2000.
- [7] F. Gunnarsson and F. Gustafsson, "Control Theory Aspects of Power Control in UMPS," Control Engineering Practice 11, pp. 1113-1125, 2003.
- [8] W. C. Su, B. H. Jung, S. Y. Chang, and Z. Gajic, "Unified Continuous and Discrete-Time Uplink Power Control Problem Formulation for SIR-Based Wireless Networks," IEEE Sarnoff Symposium, 2009.

저 자 소 개



정 보 환(정회원)

1987년 경북대학교 전자공학과  
학사 졸업.

1992년 경북대학교 전자공학과  
석사 졸업.

2006년 경북대학교 전자공학과  
박사 졸업.

1992년 1월~1998년 2월 (주)대우중공업

1995년 9월~1997년 2월 TRW Inc.

다목적 실용 인공위성 1호기 개발 참여

1998년 3월~현재 용인송담대학 정보통신전공  
부교수

2008년 7월~2009년 2월 Visiting Scholar,  
Rutgers University

<주관심분야 : 이동 무선망 전력제어, 레이다 표  
적추적>



김 문 갑(정회원)

1990년 경북대학교 전자공학과  
학사 졸업.

1992년 경북대학교 전자공학과  
석사 졸업.

2000년 경북대학교 전자공학과  
박사수료.

1992년 3월~2000년 2월 (주)대우중공업

2000년 3월~현재 용인송담대학 디지털전자전공  
부교수

<주관심분야 : 컴퓨터비전, 공장자동화, 표적추  
적>