

# 순방향 빔형성 스마트 안테나 시스템 설계의 필수 고려 사항에 대한 연구

## A Survey of Essential Considerations in the Design of Downlink Beamforming of Smart Antenna System

이 원 철 · 최 승 원\*

Weon-Cheol Lee · Seung-Won Choi\*

### 요 약

순방향 빔형성은 무선 인터넷, VOD(Video-On-Demand), 멀티미디어 서비스 등이 요구되는 최근의 이동통신 시스템에서 아주 중요하다. 본 논문은 스마트 안테나 시스템의 순방향 빔형성 구현에 있어서 간과되어서는 안될 필수 고려사항들을 언급하고 이의 성능을 분석한다. 본 논문에서 고려된 사항으로는 캘리브레이션 방법 및 절차, 보조 파일럿 채널의 개념과 그에 따른 단말기 수신 성능, 기지국 HPA 전력 할당, 순방향/역방향 처리율 비교 등으로 이는 순방향 빔형성 구현에 있어서 반드시 알고 설계해야 하는 항목이다.

### Abstract

Downlink beamforming is very important in recent mobile communications which requires wireless internet, VOD(Video-On-Demand), multimedia services. This paper addresses and analyzes the essential considerations for downlink beamforming of smart antenna system to provide wanted characteristics. Major considerations in this paper are HPA power allocation for downlink beamforming, received power at mobile terminal, concept and performance of auxiliary pilot channel, importance and method of array calibration, and throughput comparison of downlink and uplink. All above mentioned items are investigated in this paper.

Key words : Smart Antenna, Beamforming, Downlink, Calibration

### I. 서 론

순방향 빔형성(downlink beamforming)은 가입자 수신기 방향으로 가입자 수신기가 필요로 하는 조건을 충족하는데 필요한 전력만을 집중시킴으로써 기지국 전체 송신 전력을 크게 감소시킬 수 있으며, 순방향 전력을 공간적으로 제어하여 CDMA 시스템 성능을 크게 개선할 수 있다<sup>[1],[2]</sup>. 또한, 각각의 사용자에 대해 미리 그 사용자의 방향으로 최대의 이득을

갖는 웨이트 벡터를 곱하여 신호를 송신하기 때문에 CDMA와 같이 여러 사용자 신호를 한꺼번에 송신하는 경우에 있어서 다중접속에 기인하는 간섭을 제거할 수 있다<sup>[3]</sup>.

역방향(uplink) 빔형성에서 기지국은 단말기가 제공하는 파일럿 채널을 통해 역방향 채널정보를 알 수 있다. 그러나, 순방향 빔형성에서는 기지국이 순방향 채널정보를 모르기 때문에 순방향 빔형성 구현에 여러 가지를 반드시 고려해야 한다. 첫째로, 각

\*본 연구는 대학 IT 연구센터 육성지원사업의 연구결과로서 HY-SDR 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었음.

용인송담대학 정보통신과(Dept. of Information and Communications, Yong-In Songdam College)

\*한양대학교 전기전자컴퓨터공학부(School of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University)

· 논문 번호 : 20040510-063

· 수정완료일자 : 2004년 6월 11일

안테나 채널간의 서로 다른 위상특성은 원하는 사용자에게 최적의 빔패턴 제공을 어렵게 한다. 따라서, 수신모드로부터 얻어진 최적의 빔패턴을 송신모드에서도 제공하려면 캘리브레이션(calibration)을 통해 스마트 안테나 시스템의 각 안테나 소자에 연관된 경로들의 위상 특성이 보정되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위해 각 안테나 채널간의 위상차를 제거하기 위한 간단하고 정확한 캘리브레이션 방법을 제안한다.

둘째로, 트래픽 채널은 좁은 빔을 사용하여 전송하고, 파일럿 채널은 섹터를 커버하는 넓은 빔을 사용하여 전송하면, 두 채널은 동일채널로 간주되지 않으며 서로 다른 위상관계를 나타낸다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 각 가입자에게 보조 파일럿(auxiliary pilot) 채널을 할당하여 그에 따른 단말기 수신 성능 및 호처리 절차를 제시하고, 단말기 수신 전력과 기지국 HPA(High Power Amplifier) 전력 할당(power allocation)을 분석한다.

셋째로, 역방향 통신은 단말기에서 기지국까지의 신호 이동경로 길이가 사용자마다 서로 다른 반면, 순방향 통신은 모든 사용자 신호가 동시에 확산, 변조되어 단말기에 수신된다. 본 논문에서는 이러한 순방향/역방향 통신의 특성차이로 인한 처리율(throughput)을 분석한다.

## II. 채널 모델

그림 1은 스마트 안테나 기지국의 순방향 빔형성 구조를 나타내고 있다. 기지국은  $N$ 개의 안테나 소자로 구성되며  $J$ 명의 사용자 신호를 동시에 송신한다. 순방향 빔형성에서 전송신호를 송신할 때는 각 단말기로의 전송신호에 확산부호를 곱하여 전송신호를 확산시킨 후 웨이트 벡터와 곱하여 각 안테나 소자를 통해 송신하며 기지국 송신신호는 다음과 같다.

$$s(t) = \sum_{j=1}^J \sqrt{P_j} w_j^H d_j(t) W_j(t) \quad (1)$$

여기서  $P_j$ ,  $d_j(t)$ ,  $w_j$ 는  $j$ 번째 사용자 신호의 송신 전력, 전송신호, 전송신호의 웨이트 벡터,  $W_j(t)$ 는 왈쉬(Walsh) 부호를 나타낸다. 또한  $H$ 는 웨이트 벡터의 복소 공액 전치(complex conjugate transpose)를 나타낸다. 기지국에서 전송되는 신호가 단말기  $j$ 에 수

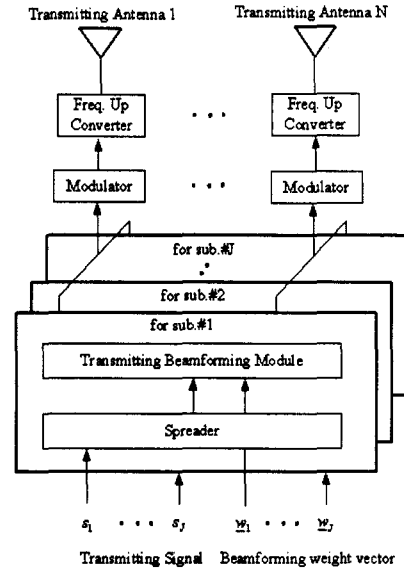


그림 1. 스마트 안테나 기지국의 순방향 빔형성 구조  
Fig. 1. Structure of smart antenna base station with downlink beamforming.

신된 신호는 다음 식과 같다.

$$r_j(t) = \sum_{k=1}^K s(t - \tau_k) \cdot h_k + n_j(t) \quad (2)$$

여기서  $K$ 는 다중경로의 수,  $n_j(t)$ 는 AWGN,  $h_k$ 는 채널벡터를 나타낸다. 식 (2)에서 모든 산란체(scatterer)들의 전파지연은 동일하다고 가정하였다. 또한 단말기와 기지국간의 채널벡터  $h_k$ 는 다음 식으로 표현된다<sup>[4]</sup>.

$$h_k = \frac{1}{\sqrt{Q}} \sum_{q=1}^Q \alpha_{k,q} a(\theta_k) \quad (3)$$

여기서  $\alpha_{k,q}$ ,  $a(\theta_k)$ 는 각각  $q$ 번째 산란체의 페이딩 인자(fading factor)와  $\theta_k$  방향으로의 방향 벡터(steering vector)를 나타낸다. 최종적인 단말기 수신 신호는 다음과 같다.

$$r_j(t) = \frac{1}{\sqrt{Q}} \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q s(t - \tau_k) \cdot \alpha_{k,q} \cdot a(\theta_k) + n_j(t) \quad (4)$$

## III. 순방향 빔형성 고려 사항

### 3-1 캘리브레이션

스마트 안테나 시스템은 각 안테나 채널간의 위

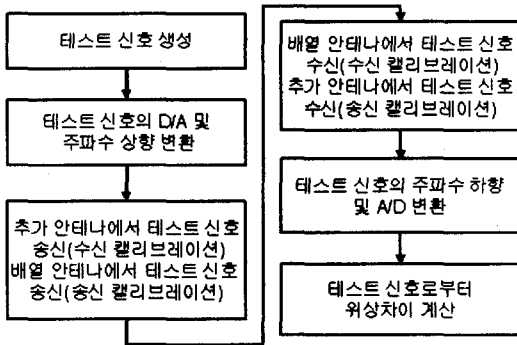
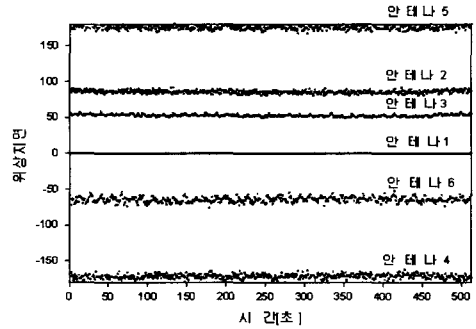


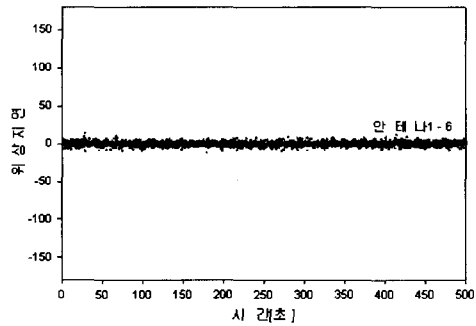
그림 2. 송·수신 캘리브레이션 절차  
Fig. 2. Procedure of TX and RX calibration.

상차를 제거하지 않으면 최적의 빔패턴을 사용자에게 제공할 수 없다. 이를 위해 본 논문에서는 각 안테나 채널간의 위상차를 제거하기 위한 간단하고 정확한 캘리브레이션 방법을 제안한다. 제안된 캘리브레이션 방법은 스마트 안테나 시스템이 동작 중에도 실행될 수 있는 자동(auto) 캘리브레이션으로 테스트 신호를 송·수신하기 위해 추가 안테나를 이용하며 그림 2는 제안된 캘리브레이션 절차를 나타낸다. 신호 경로가 송·수신에서 독립적이기 때문에 캘리브레이션은 송·수신 경로를 각기 수행한다. 그림 2에 나타난 것처럼, 수신(RX) 캘리브레이션은 기지국에서 생성한 테스트 신호를 추가 안테나를 통하여 송신한 후 배열 안테나에서 수신한 신호의 위상을 계산한다. 송신(TX) 캘리브레이션은 반대로 테스트 신호를 배열 안테나에서 송신한 후 추가 안테나가 수신하여 각 안테나 채널의 위상을 계산한다.

그림 3(a)는 이러한 방법에 의한 수신 캘리브레이션 전·후의 각 안테나 채널간의 위상차를 1번 안테나를 기준으로 측정된 결과이다. 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이, 각 안테나 채널간 위상차는 시간에 따라 큰 변화 없이 일정한 값을 갖기 때문에 캘리브레이션을 통해 각 안테나 채널간 위상차를 제거할 수 있다. 그림 3(b)는 그림 2의 방법에 의한 수신 캘리브레이션 후의 위상지연을 나타낸다. 그림 3(b)에서 알 수 있듯이 각 안테나 채널간의 위상차가 제거되어 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다. 그림 4는 120° 방향에 있는 단말기로의 송신 빔패턴을 나타내는 것으로 캘리브레이션 후 단말기 방향으로 적절한 빔이 형성됨을 알 수 있다.



(a) 수신 캘리브레이션 전  
(a) Before RX calibration



(b) 수신 캘리브레이션 후  
(b) After RX calibration

그림 3. 수신 캘리브레이션 전후의 위상차  
Fig. 3. Phase delay before/after RX calibration.

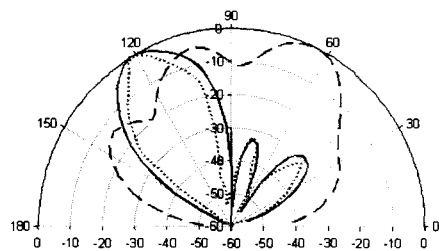


그림 4. 120도 방향에 있는 단말기를 위한 송신 빔패턴(dotted line: 수신 빔패턴, dashed line: 캘리브레이션 전의 빔패턴, solid line: 캘리브레이션 후의 빔패턴)  
Fig. 4. Beam pattern to mobile terminal in the direction of 120 degree(dotted line: RX beam pattern, dashed line: beam pattern before calibration, solid line: beam pattern after calibration).

### 3-2 보조 파일럿 채널

기지국에서 파일럿 채널과 빔형성된 트래픽 채널

을 송신할 경우 단말기가 수신한 두 채널은 서로 다른 위상 특성을 나타낼 수 있다. 특히 순방향의 다중 경로는 넓은(sector wide) 파일럿 채널과 좁은 빔으로 전송된 트래픽 채널간의 위상관계를 변화시킬 수 있다. 예를 들어, 스마트 안테나 기지국이  $\theta$  방향의 웨이트 벡터를 트래픽 채널에 적용하고 파일럿 채널과 동시에 송신하였을 때, 이 신호를 한 칩( $T_c$ ) 구간내에 2개의 경로( $\tau_1, \tau_2$ )로 수신한 단말기는 서로 다른 위상을 갖는 파일럿 채널과 트래픽 채널을 수신하게 된다. 이는 트래픽 채널을 복조할 때 오류를 야기하며 이를 해결하기 위해 보조 파일럿 채널을 사용한다. 보조 파일럿 채널의 사용에 대한 기본적인 사항은 3GPP2 규격에 정의되어 있다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서는 사용자마다 각각의 보조 파일럿 채널을 트래픽 채널과 함께 동일한 웨이트 벡터로 빔형성하여 송신하는 방법을 제안한다.

먼저, 기지국에서 파일럿 채널과 빔형성된 트래픽 채널을 송신하는 경우, 단말기가 이 신호를 한 칩 구간 내에 2개의 경로로 수신하면 이는 식 (4)로부터 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^2 \alpha_k \{ w^H [d_{tch}(t) \cdot W_{tch}(t) \cdot a(\theta_k) + d_{pich}(t) \cdot W_{pich}(t)] \} \quad (5)$$

여기서는 단일 산란체, 단일 사용자로 심볼구간 동안 페이딩 인자는 일정하다고 가정하고 채널의 잡음과 전파지연은 생략하였다. 단말기는 채널정보를 얻기 위해 파일럿 채널의 알쉬 부호를 곱하고 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$y_{pich} = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (6)$$

이와 마찬가지로 트래픽 채널의 데이터를 얻기 위해 식 (5)에 트래픽 채널의 알쉬 부호를 곱하고 적분을 수행하면 그 결과는 다음과 같다.

$$y_{tch} = (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2) \cdot d_{tch} \quad (7)$$

위의 식에서  $w^H \cdot a(\theta_1)$ ,  $w^H \cdot a(\theta_2)$ 을 각각  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ 로 표기하였다. 따라서 최종적인 위상 복원된 신호  $\hat{y}_{tch}$ 는  $y_{tch}$ 의 공액을 취해  $y_{tch}$ 와 곱해 얻어지며 이는 다음과 같다.

$$\hat{y}_{tch} = (\alpha_1 + \alpha_2)^* (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2) \cdot d_{tch} \quad (8)$$

그러나 식 (8)은 채널의 위상 특성이 완전히 제거되지 못하고 트래픽 채널 복조시 오류를 유발함을 알 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 각각의 트래픽 채널마다 보조 파일럿 채널을 사용하여 각 경로의 위상 특성을 제거해야 한다.

보조 파일럿 채널을 각 사용자에게 할당하여 빔형성하기 위해서는 트래픽 채널과 같이 알쉬 부호를 이용한 사용자별 채널 구분이 필요하다. 만약 트래픽 채널에 사용된 알쉬 부호와 같은 길이의 알쉬 부호를 사용하면 트래픽 채널에 할당될 알쉬 부호의 자원부족을 초래하기 때문에 트래픽 채널에 할당된 알쉬 부호를 128, 256, 512의 길이로 확장하여 보조 파일럿 채널 할당에 사용한다. 기지국에서 보조 파일럿 채널을 사용하여 트래픽 채널과 함께 동일한 웨이트 벡터로 빔형성을 하여 송신한 경우, 단말기가 한 칩구간 내에 두개의 경로로 수신한 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^2 \alpha_k \{ w^H [d_{tch}(t) \cdot W_{tch}(t) + d_{apich}(t) \cdot W_{apich}(t)] \cdot a(\theta_k) \} + d_{pich}(t) \cdot W_{pich}(t) \quad (9)$$

여기서  $d_{apich}(t)$ 는 보조 파일럿 채널의 데이터로 항상 1인 값을 가지며,  $W_{apich}$ 는 보조 파일럿 채널에 할당된 알쉬 부호를 나타낸다. 단말기의 최종 위상 보상된 신호는 식 (8)과 같은 원리를 적용하면 다음과 같다.

$$\hat{y}_{tch} = |\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2|^2 \cdot d_{tch} \quad (10)$$

식 (10)에서 알 수 있듯이 보조 파일럿 채널을 이용한 빔형성한 경우는 식 (8)과 달리 채널의 위상 특성을 정확하게 알아내어 복조를 수행한다.

그림 5, 6은 두 개의 경로가 한 칩 이상과 이내의 지연시간으로 단말기에 수신되는 경우의 단말기 BER(Bit Error Rate)을 나타내는 것으로, 웨이트 벡터의 계산을 위해 적용 빔형성 알고리즘<sup>[6]</sup>이 사용되었다. 그림 5, 6에서 4개의 배열안테나, 순방향/역방향의 캐리어 주파수는 각각 1.86625 GHz, 1.77625 GHz, 단말기의 속도는 100 km/h로 가정하였고 각각의 사용자는 -60도와 60도 사이에서 균일분포로 가정하였다. 그림 5의 경우, 보조 파일럿 채널을 사용하는

것은 셀 내의 다른 사용자에게 간섭의 증가를 초래하여 파일럿 채널만을 사용하는 것보다 약간의 성능 저하를 야기한다. 또한 배열안테나 사용시 빔형성이득으로 인해 단일 안테나에 비해 우수한 성능을 나타낸다. 그러나 그림 6의 경우에는 파일럿 채널만을 사용하면, 파일럿 채널과 트래픽 채널의 위상 차이로 많은 오류가 발생한다. 반면, 보조 파일럿 채널을 사용할 경우, 빔형성된 보조 파일럿 채널과 트래픽 채널이 동일한 채널정보를 갖고 수신되어 위상 오류가 발생하지 않으며, 단말기 수신전력 또한 단일 안테나 기지국에 비해 증가하여 단말기 수신 성능이 향상된다. 이상과 같이 보조 파일럿 채널을 사용하는 것은 분명 셀내의 다른 사용자에게 간섭의 증가를 초래하나, 간섭의 증가가 주는 악영향보다는 각 경로의 정확한 기준위상 제공으로 인해 얻는 이득이 더 큼을 알 수 있다.

### 3.3 HPA 전력 할당

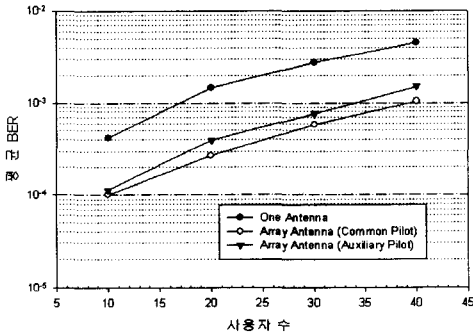


그림 5. 순방향 빔형성  $BER(|\tau_1 - \tau_2| > T_d)$   
 Fig. 5. BER of downlink beamforming ( $|\tau_1 - \tau_2| > T_d$ ).

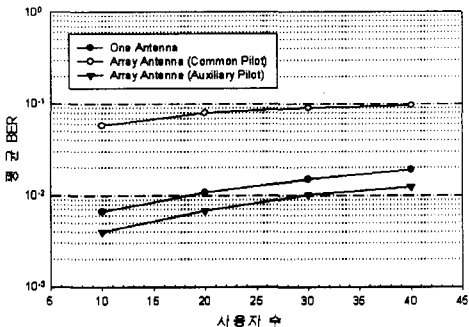


그림 6. 순방향 빔형성  $BER(|\tau_1 - \tau_2| < T_d)$   
 Fig. 6. BER of downlink beamforming ( $|\tau_1 - \tau_2| < T_d$ ).

기지국에서 최적의 송신 웨이트 벡터로 빔형성하여 신호를 송신하면 각 안테나 소자의 신호가 단말기에서 서로 동위상으로 합쳐지므로, 단일 안테나 기지국과 기지국 송신 출력이 동일하더라도 단말기 수신 전력은 최대  $N$ 배 증가한다. 이는 스마트 안테나 시스템을 이용하여 셀 커버리지를 증가시킬 수 있는 장점으로 활용 될 수도 있지만, 다른 한편으로는 스마트 안테나 시스템을 기존 통신망에 사용할 경우 셀 설계를 다시 해야 하는 번거로움을 유발시킨다. 따라서 이를 방지하기 위해 스마트 안테나 시스템 기지국의 송신 전력을 기존 단일 안테나 기지국의  $1/N$ 로 줄여야 한다. 즉, 스마트 안테나 기지국의 각 안테나 HPA의 평균 송신전력이  $1/N^2$ 이 되어야 하며 이로부터 발생하는 스마트 안테나 시스템 송신전력 절약 효과는 통신 용량 증가나 큰 송신 전력이 요구되는 고속 데이터 통신 채널의 품질 향상에 이용될 수 있다. 표 1은 6개의 안테나로 이루어진 스마트 안테나 기지국과 단일 안테나 기지국으로부터의 단말기 수신 전력비를 나타낸다. 표 1에서와 같이 순방향 빔형성에 의해 단말기 수신 전력이 큰 이득이 있음을 알 수 있다.

### 3.4 순방향과 역방향의 처리율

순방향 통신에서는 모든 사용자 신호가 동시에 확산, 변조되어 단말기에 수신되기 때문에 각 사용자간의 직교성이 보장된다. 그러나, 역방향 통신에서는 단말기에서 기지국까지의 신호 이동경로 길이가 각 사용자마다 다르기 때문에 모든 사용자가 다른 사용자에 관한 판별기준에 간섭을 주게 되어 순방향 통신에 비해 BER이 높게 되고 처리율 또한 작아진다<sup>[7]</sup>. 표 2는 단일경로의 부호화되지 않은(un-coded) BER  $10^{-1}$ 에서 단일 안테나와 스마트 안테나(역방향은 6개, 순방향은 4개의 안테나를 사용)의 순

표 1. 단말기 수신 전력비(스마트 안테나/단일 안테나)  
 Table 1. Received signal power at mobile terminal (smart antenna/one antenna).

사용자수	이론치	AWGN 채널	Fading 채널
1	6배	5.98배	4.6 배
10	6배	5.25배	4.32배
20	6배	4.94배	4.06배

표 2. 순방향과 역방향의 처리율 분석  
Table 2. Throughput analysis of uplink and downlink.

모드	역방향 처리율	순방향 처리율	처리율 비
단일 안테나 처리율	57.6 kbps	1584 kbps	27.5
스마트 안테나 처리율	259.2 kbps	2536 kbps	9.8
처리율 비	4.5	1.6	

방향/역방향 처리율을 나타낸다. 표 2에 나타난 것처럼 순방향과 역방향의 빔형성 이득은 각각 1.6배와 4.5배가 되며, 스마트 안테나의 경우 순방향의 처리율은 역방향에 비해 9.8배가 된다. 이로부터 빔형성 이득은 순방향보다는 역방향의 용량 증가에 크게 기여하며, 시스템 용량의 병목(bottleneck)은 순방향이 아니라 역방향에 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

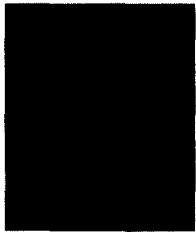
본 논문은 순방향 빔형성 스마트 안테나 시스템 구현 시 간과되어서는 안될 필수 고려 사항들을 언급하고 이를 분석하였다. 순방향 빔형성 기술을 사용하기 위해서는 빠르고 정교한 캘리브레이션 기술을 통해 각 안테나 채널간의 위상 지연 특성을 없애 주어야 하며, 트래픽 채널과 파일럿 채널간의 위상차를 방지하기 위해 보조 파일럿 채널을 할당하여 빔형성에 사용하고 이와 관련된 호처리 절차도 수정되어야 한다. 또한, 기존 통신망의 셀 크기를 유지하기 위해 각 안테나 HPA의 평균 송신 전력은 단일 안테나 기지국에 비해  $1/N^2$ 되어야 하며, 역방향/순방향 통신의 근본적인 채널 특성과 처리율 차이를 반

드시 고려하여야 한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. C. Liberti, Jr., T. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications*, Prentice Hall PTR, 1999.
- [2] J. S. Blogh, L. Hanzo, *Third Generation Systems and Intelligent Wireless Networking: smart antennas and wireless networking*, John Wiley and Sons, 2002.
- [3] G. Xu, H. Liu, "An effective transmission beamforming scheme for frequency division duplex digital wireless communication systems", *Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP-95*, vol. 3, pp. 1729-1732, May 1995.
- [4] W. C. Lee, S. Choi, J. Choi and M. Suk, "An adaptive beamforming technique for smart antennas in WCDMA system", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86-B, no. 9, pp. 2838-2843, Sep. 2003.
- [5] 3GPP2, "Physical layer standards for cdma2000-spread spectrum systems", *C.S0002-C*, v1.0, 2002.
- [6] S. Choi, D. Shim, "A novel adaptation beamforming algorithm for a smart antenna system in a CDMA mobile communication environment", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 5, pp. 1795-1799, Sep. 2000.
- [7] G. G. Raieigh, S. N. Diggavi, V. K. Jones and A. Paulraj, "A blind transmit antenna algorithm for wireless communication", *ICC*, Seattle, U.S.A., pp. 1494-1499, Jun. 1995.

## 이 원 철



1992년 2월: 한양대학교 전자통신  
공학과 (공학사)

1994년 2월: 한양대학교 전자통신  
공학과 (공학석사)

1994년 1월~2001년 1월: LG전자  
연구원

2003년 3월: 한양대학교 전자통신전  
파공학과 박사과정 수료

2001년 3월~현재: 용인송담대학 정보통신과 교수  
[주 관심분야] 통신신호처리, 스마트 안테나 시스템, 디지  
털방송기술

## 최 승 원



1980년 2월: 한양대학교 전자공학  
과 (공학사)

1982년 2월: 서울대학교 전자공학  
과 (공학석사)

1985년 12월: Syracuse Univ. 전산공  
학석사

1988년 12월: Syracuse Univ. 전기  
및 전산과 (공학박사)

1992년 8월~현재: 한양대학교 전기전자컴퓨터공학부 교  
수

[주 관심분야] 스마트안테나 시스템, 디지털통신, DSP 응  
용