

# 주파수 분할 통신 환경에서 Downlink Beamforming 기법 연구

이용주 · 양승용 · 김기만

한국해양대학교

## A Study on Downlink Beamforming in FDD Environments

Yong-joo Lee · Seung-yong Yang · Ki-man Kim

Dept. of Radio Science and Engineering, Korea Maritime University

E-mail : yongjoo@popsmail.com

### 요 약

디지털 이동통신 시스템의 성능은 신호의 fading과 다른 사용자에 의한 간섭에 영향을 받는다. 이런 효과들을 줄여주기 위해서 기지국에서 어레이 안테나를 사용하려는 연구가 이루어지고 있다. A 어레이 안테나를 이용한 통신은 지금까지 uplink 방향에 대한 연구가 주를 이루었으나, 최근에는 downlink 에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 FDD 방식을 기초로 한 이동통신 시스템에서 downlink beamforming 기법을 제안한다. 기존의 방식들과 제안된 기법 사이의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하였다

### 1. 서 론

어레이 안테나 기술은 이동 통신 시스템의 용량증대, 효율적인 스펙트럼 사용, 통화 품질 향상 등을 위해 제안 되어왔다. 그러나 지금까지 대부분은 mobile로부터 기지국에 이르는 상향링크 채널을 위한 연구였으며, 반대로 기지국에서 mobile에 이르는 하향링크에서 송신 빔 형성은 최근에야 학술적인 관심이 이루어지기 시작하였다. 이러한 기술들은 향후 상용 서비스가 예상되는 IMT-2000 시스템 규격에 적합한 배열 신호처리 기술로의 개발이 필요하다.

송신 빔 형성 기법들을 주파수 분할 환경(FDD)과 시간 분할 환경(TDD)으로 나누어 고려할 수 있다. 송수신 주파수가 같은 대신 시간을 분할하여 통신하는 TDD의 경우 상향링크와 하향링크의 채널 특성이 같으므로 상향링크에서 추정된 채널 특성을 이용하여 그대로 하향링크에 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 FDD 환경의 경우 TDD와는 달리 송수신 주파수가 서로 다르기 때문에 페이딩 채널 특성도 달라지게 되어 상향링크에서 얻어진 채널 정보를 하향링크에 직접 적용할 수 없다.

고정된 빔 형성 방법은 미리 정해진 방향으로 송신 빔을 형성하는 것으로 비교적 쉽게 구할 수 있는 장점이 있으나 성능이 낮다는 문제점이 있다. 하향링크 채널 특성 추정을 위한 feedback 방법은 정확한 송신 빔을 형성할 수 있는 장점 [3]이 있지만 채널 특성이 바르게 변화하는 경우

이를 추적하기 위해서는 빠른 feedback rate를 가져야 하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 연구된 것이 채널 특성을 추정하는 것이 아닌 고유 부공간을 추정하여 feedback 하는 방법으로 상대적으로 고유 부공간의 변화율이 낮다는데 기인하고 있다. 원하는 mobile의 방향 벡터를 사용하는 방법은 원하는 mobile로 빔은 형성하지만 나머지 mobile로도 어느 정도 이득을 갖게 되어 성능이 저하되고, pseudo inverse를 하는 경우 성능은 향상되나 pseudo inverse를 위한 계산이 많이 요구된다 [1.]

이상과 같이 각 방법들은 장점과 단점을 갖고 있으므로 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 기존의 송신 빔 형성 기법들을 연구하고 나아가 개선된 성능을 갖는 송신 빔 형성 알고리즘을 제안한다. 제안한 방법은 시뮬레이션을 통해 그 성능을 기존의 방법들과 비교하고 검증하였다. 이러한 송신 빔 형성 기술은 원래의 목적인 통화 품질 향상뿐만 아니라 최근 연구가 이루어지기 시작한 시공간 부호화(space-time coding) 기법에서 송신 다이버시티 기법으로써 응용되어 결국 고속, 대용량 데이터 전송을 가능하게 할 것이다.

### II. 기존 하향링크에서의 송신 빔 형성 기법

#### 1. feedback을 이용한 송신 빔 형성[3]

m개의 송신 안테나와 d개의 mobile이 존재하는 그림 1과 같은 환경에서 임의의 k번째 mobile

$h$ 한 채널 벡터를  $a_k$ 라 하자.

$$a_k = [a_{1k} \dots a_{mk}]^T \quad (1)$$

기서  $a_{ik}$ 는  $i$ 번째 안테나와  $k$ 번째 mobile 사이의 복소 채널 응답이다. mobile이  $d$ 개이므로  $m \times d$  채널 행렬  $A$ 는 다음과 같다.

$$A = [a_1 \dots a_d] \quad (2)$$

이제 송신 빔 형성을 위한 계수 벡터를  $w_j$ 라 하면 계수 행렬은 다음과 같다.

$$W = [w_1 \dots w_d] \quad (3)$$

만약  $k$ 번째 mobile에서 수신한  $j$ 번째 신호의 크기를  $c_{jk}$ 라 하면 다음 식이 성립한다.

$$s_j(t)w_j^* a_k = s_j(t)c_{jk} \quad (4)$$

$$W^* A = C \quad (5)$$

$C$ 는  $c_{jk}$ 를 원소로 하는 행렬로써 대각항은 원하는 신호의 레벨이며, 나머지 항은 crosstalk의 크기이다. 따라서 완전한 송신 빔을 형성하기 위해서는 행렬  $C$ 는 항등(identity) 행렬  $I$ 와 같아야 한다.

$$W^* A = I \quad (6)$$

따라서 위 식을 만족하는 계수 행렬  $W$ 는 pseudo-inverse(+)를 사용하여 다음과 구할 수 있다.

$$W = A^{+*} \quad (7)$$

그러나 일반적으로 기지국에서는 기지국과 mobile 사이의 채널 행렬  $A$ 를 알지 못하므로 이 채널 행렬  $A$ 를 추정하기 위해 기지국에서 probing 신호를 mobile로 송신하고, mobile에서 수신한 신호를 다시 기지국으로 feedback하여 채널 행렬을 추정한다. 즉 이 방법에서는 probing 모드와 information 모드 사이의 전환을 통해 송신 빔을 형성한다. probing 모드에서는 채널 행렬을 추정하며, information 모드에서는 송신 빔을 형성한다. probing 벡터를  $V$ 라 할 때 mobile에서는  $V^* A$ 가 되며 이를  $B$ 라 할 때 다시 기지국으로 feedback함으로써 행렬  $A$ 를 구할 수 있다.

$$A = V^{+*} B \quad (8)$$

이때 probing 신호로는 복소 지수 신호를 사용할 수 있다. feedback 방법의 문제점은 시간에 따라 변화하는 채널 벡터를 추적하기 위해 높은 feedback 데이터 전송률을 가져야만 한다는 것이다.

## 2. 상향링크에서 평균 파워를 최소화하는 방법[2]

하향링크에서 쓰여지게 될 최적화된 계수 벡터를 구하기 위해 상향링크에서 원하는 성분에 대한 covariance matrix와 원하지 않는 성분의 covariance matrix  $R_I$ 를 이용하여 최적 계수 벡터를 구한다.

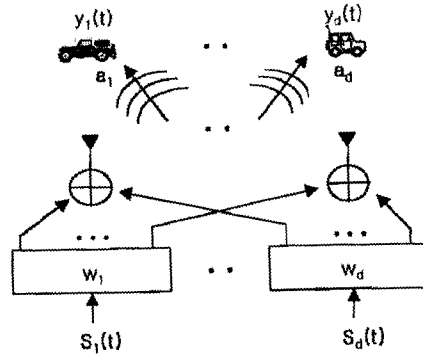


그림 1. 하향링크 Beamforming 방법

최적 계수 벡터  $w_{opt}$ 를 구하기 위한 해는 다음 식의 largest eigenvalue of the generalized eigen problem으로 구해진다.

$$R_D w = \lambda_{\max} R_I w \quad (9)$$

## 3. 조향 벡터 또는 Spatial Signature 벡터를 이용한 송신 빔 형성 [4]

Winters등은 송신 빔 형성을 위해 먼저 기지국에서 수신한 데이터로부터 공분산 행렬을 구하고 이를 이용하여 mobile 신호의 입사각을 추정하는 방법을 제안하였다. 이때 입사각 추정을 위해 일반적으로 고 분해능 기법으로 알려진 MUSIC, ESPRIT등을 사용할 수 있으며, 추정된 입사각을 이용해 조향 벡터를 구성할 수 있다. 결국 송신 빔 형성을 위한 계수 벡터는 다음과 같다.

$$w = a(\theta_i) \quad (10)$$

이 방법은 원하는 mobile 방향으로 송신 빔을 형성하지만 다른 mobile 방향으로도 어느 정도 이득을 갖는 부엽 범위에 속하게 되므로 다른 mobile의 입사각에 따라서는 성능이 크게 저하될 수 있다. 즉 원하는 mobile과 다른 mobile이 근접해 있는 경우 다른 mobile이 송신 빔의 mainlobe에 놓이게 되어 성능이 떨어진다.

Spatial Signature 방법은 앞선 조향 벡터 대신에 spatial signature 벡터를 사용한다는 점이 다르다. Spatial signature 방법에서 계수 벡터는 spatial signature 벡터의 complex conjugate로 주어진다.

## 4. 부공간을 이용한 송신 빔 형성[1]

채널 벡터를 직접 추정하기 보다 채널의 부공간을 추정하여 송신 빔 형성에 사용하는 방법이다.

$$a_k = \sum_{i=1}^N a_{ki} b_{ki} \quad (11)$$

$a_{ki}$ 는 mobile의 위치와 carrier의 파장에 의해 결정되는 복소수이며,  $b_{ki}$ 는 mobile의 방향에 의해 결정되는 벡터이다. 따라서  $a_k$ 는 부공간  $\Phi_k = \text{span}[b_{k1} \cdots b_{kN}]$ 상에 놓이게 된다. mobile이 이동하는 경우 fast fading에서  $a_k$ 는 수시로 변화하지만 상대적으로 부공간  $\Phi_k$ 는 천천히 변화하므로 feedback rate가 감소한다. 따라서 계수 벡터는 원하는 mobile의 파워를 최대화하면서 다른 mobile의 부공간들과는 서로 직교하도록 한다.

$$w_j \perp \Phi_k \text{ for } j \neq k \quad (12)$$

$w_j = \sqrt{p_j} u_j$ 라 할 때 unit norm 제한조건 ( $u_j^H R_j u_j = 1$ )을 가지면서 SNR을 최대화하는 해를 구한다.  $u_j$ 는 원하는 mobile 성분과 나머지 mobile 성분으로 구성된 공분산 행렬의 가장 큰 고유치에 대응하는 일반화된 고유벡터이다.

### III. 제안한 송신 빔 형성 알고리즘과 성능 분석

제안하는 방법을 설명하기 위하여 K개의 mobile이 존재하고 각 mobile은 각각 L개의 다중경로를 갖는다고 가정한다. 이때 상향링크에서 어레이 안테나로 수신한 신호 벡터  $x(t)$ 는 다음과 같다.[6]

$$x(t) = \sum_{i=1}^K \sum_{l=1}^L \sqrt{P_{l,i}} s_i(t - \tau_{l,i}) e^{j\phi_{l,i}} a_{l,i} + n(t) \quad (13)$$

여기서,  $P_{l,i}$ 와  $\phi_{l,i}$ 는 각각 l번째 다중경로에 있는 i번째 사용자의 평균 파워와 위상이다.  $\tau_{l,i}$ 는 시간지연을 나타낸다.  $n(t)$ 는 Gaussian noise 이다.  $a_{l,i}$ 는 j번째 사용자의 l번째 방향에 대한 방향 벡터를 나타낸다. 하향링크 주파수  $f_d$ 에 대한 j번째 이용자에 대한 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$R_j = \sum_{l=1}^L p_{l,j} \rho_l(f_d) a_l^H(f_d) a_l(f_d) \quad (14)$$

이 식은 원하는 사용자의 원하는 방향 벡터의 외적과 평균 전력의 곱으로 이루어져 있다. 여기서, 평균전력은 상향링크에서 수신된 사용자의 스펙트럼을 추정하여 구하였다. 여기서 Bartlett spectrum 방법을 사용하였다. 만약 mobile의 방향을 안다면 각 안테나 간격과 하향링크 주파수를 알고 있으므로 어레이 응답 벡터를 구성할 수 있다. 이와 같은 성질을 이용하여 다음과 같은 행렬을 구성할 수 있다.

$$R_{k,i} = \sum_{j=1, j \neq k}^K a_j(\theta) a_i^H(\theta) \quad (15)$$

행렬  $R_{k,i}$ 는 k번째 mobile을 원하는 사용자라 할 때 그 나머지 mobile의 어레이 응답 벡터의 외적으로 구성된 행렬이며, 이 행렬은 실제 간섭 신호의 행렬과 같은 부공간을 차지한다. 가중치 계수 벡터를 구하기 위해 k번째 mobile에 전송된 신호 대 잡음비를 최대화하는 기준을 사용한다.

$$SINR_k = \frac{E[|w_k^H a_k(\theta)|^2]}{E[\sum_{j=1, j \neq k}^K |w_j^H a_j(\theta)|^2]} \quad (16)$$

이러한 기준의 해는 다음과 같다.

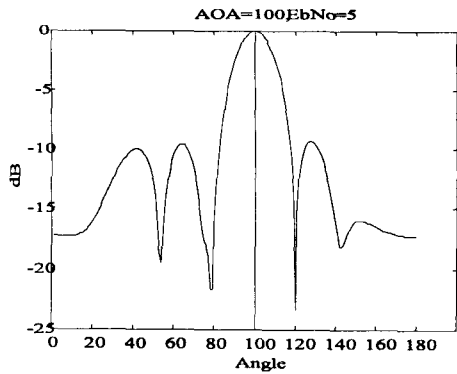
$$w_k = R_{k,i}^{-1} a_k(\theta) \quad (17)$$

결국 가중치 계수 벡터는 다른 mobile과는 서로 직교하는 부공간으로 사상(mapping)하게 되어 원하는 mobile의 방향으로만 송신 빔을 형성할 수 있다. 이는 multipath 환경으로 확장할 있는데 상향링크로부터 얻어진 각 multipath 정보를 이용하여 필요한 finger 수만큼 독립된 송신 빔을 형성한다. 또한 위의 방법에 있어서 역행렬 계산시 rank 부족으로 인해 수치연산의 오류를 방지하기 위해 고유 부공간을 이용하여 그러한 오류가 생기지 않도록 하는 방법을 연구한다.

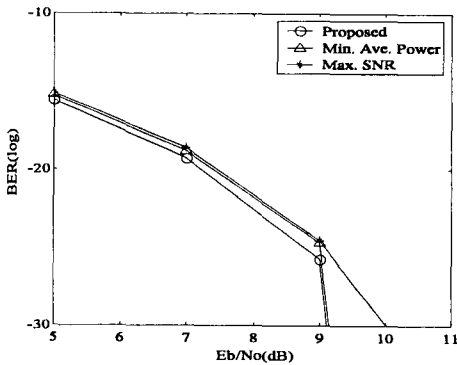
### IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

기존의 방법과 제안된 방법의 성능 비교를 위한 시뮬레이션을 위해, 환경은 5명의 사용자가 각각 2개의 다중경로를 가지는 것으로 가정하였다. 각 사용자의 방향은 [80, 100, 120, 140, 160]° 이고, 다중경로의 방향은 각 사용자에 대해서 [10,15 20,25 30,35 40,45 50,55]° 의 방향이다. 기존의 방법 제안된 방법의 성능을 비교하기 위해서, 제안된 방법에 대한 beam pattern과 각 방법의 Bit Error Ratio (BER)를 측정하였다.

먼저 그림2에 (a)는 제안된 방법에 대한 Beam pattern을 그린 것으로 원하는 사용자의 방향이 100° 일 때이고,  $E_b/N_0$ 는 5dB로 하여 시뮬레이션 하였다. 그림2에 (b)는 평균 파워를 최소화하는 방법과 사용자에게 대한 SINR을 최소화하는 방법의 두 가지와 제안된 방법에 대한 BER performance를 측정하였는데, 그림에서 보는 바와 같이 제안된 기법이 성능이 기존의 방법에 비해서 우수함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 2. (a) beampattern, (b) BER performance

### V. 결론

본 논문에서는 상향링크와 하향링크의 채널 특성이 다른 FDD 환경에서 쓰여지는 기존의 방법에 대한 장단점을 살펴보았다. feedback 방법은 정확한 송신 빔을 형성할 수 있는 장점이 있지만 채널 특성이 빠르게 변화하는 경우 이를 추적하기 위해서는 빠른 feedback rate를 가져야 하는 단점이 있다. 고유 부공간을 이용한 방법의 위의 문제점은 해결하였지만, 성능을 향상 시키기 위해서 사용되는 pseudo inverse의 계산량이 많다는 문제점이 있다. 본 논문에서는 이런 문제점을 보완하는 새로운 알고리즘을 제시하였고, 그것의 시뮬레이션 결과들을 기존의 방법들과 비교, 분석하여, 제시된 방법이 기존의 방법에 비해서 나은 성능을 보임을 알 수 있었다.

앞으로 여기서는 고려하지 않았던 fading이 존재하는 환경에 대한 알고리즘을 제시하고, 시뮬레이션을 통해서 그것을 성능을 평가하는 것이다.

### 참고문헌

[1] D. Gerlach, "Cellular CDMA downlink

beamforming in multipath environments," pp.270-276.

- [2] Hiromitsu Asakura, Tadashi Matsumoto, "Cooperative Signal Reception and Down-Link Beam Forming in Cellular Mobile Communications," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 48, no.2, pp.333-341, March 1999.
- [3] D. Gerlach and A. Paulraj, "Adaptive transmitting antenna arrays with feedback," *IEEE Signal Proc. Letters*, vol.1, no.10, pp.150-152, Oct. 1994.
- [4] J.H. Winters, J. Salz and R.D. Gitlin, "The impact of antenna diversity on the capacity of wireless communication systems," *IEEE Trans. Communications*, vol.42, no.2/3/4, pp.1740-1751, Feb./March/Apr. 1994.
- [5] J.S. Thompson, J.E. Hudson, P.M. Grant and B. Mulgrew, "CDMA downlink beamforming for frequency selective channels,"
- [6] Ayman F. Naguib "Adaptive Antennas for CDMA Wireless Networks," Ph.d thesis, University of Stanford, August. 1996