

---

# 고품질 · 고속 무선 멀티미디어 서비스를 위한 송신 빔 형성기 설계

이용주\*, 양승용\*, 김기만\*

Design of Downlink Beamformer for High-quality · High-speed Wireless Multimedia Services

Yong-joo Lee, Seung-yong Yang and Ki-man Kim

---

이 논문은 2000년도 정보통신부에서 지원하는 대학기초연구지원사업에 의해 수행되었음

---

## 요 약

주파수 분할 통신 환경에서 어레이 안테나를 사용하는 송신 빔 형성 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은 상향링크에서 각 사용자의 방향과 스펙트럼을 추정하고 이로부터 하향링크 주파수에 맞춰 간섭신호의 공간 공분산 행렬을 구성한다. 이 공분산 행렬과 원하는 사용자의 방향 벡터를 이용하여 빔 형성 가중치를 계산한다. 성능을 고찰하기 위해 Rayleigh 페이딩 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 방법은 기존의 방법에 비해 데이터 교환을 필요로 하지 않으며, 비트 오차율 측면에서도 향상된 성능을 나타내었다.

## ABSTRACT

We propose a transmit beamforming algorithm for array antenna in FDD (Frequency Division Duplex) environments. The proposed method estimates the directions and spectra of the users, and constructs the spatial covariance matrix of the interferences at the downlink frequency. The weights are computed by that covariance matrix and desired user's direction vector. Simulations are performed under Rayleigh fading environments. The proposed method don't need the data feedback, has the enhanced performance in BER (Bit Error Rate).

## 키워드

송신 빔 형성, 하향링크, Rayleigh 페이딩, 비트 오차율

---

\* 한국해양대학교 전파공학과  
접수일자 :

## 1. 서 론

어레이 안테나 기술은 이동 통신 시스템의 용량 증대, 효율적인 스펙트럼 사용, 통화 품질 향상 등을 위해 연구되어왔다. 그러나 지금까지 대부분은 사용자로부터 기지국에 이르는 상향링크 채널을 위한 연구였으며, 반대로 기지국에서 사용자에 이르는 하향링크에서 송신 빔 형성은 최근에서야 학술적인 관심이 이루어지기 시작하였다. 송신 빔 형성은 원하는 사용자로만 데이터를 전송해 주기 때문에 낮은 오차율을 실현함으로써 통신 품질이 향상되고 기지국의 전력 소모를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 그 동안 많은 연구가 2세대 이동 통신 시스템에 해당하는 기존의 IS-95 규격에 따른 협대역 CDMA 시스템에 맞추어져 왔으나 곧 상용 서비스가 예상되는 IMT-2000 시스템 규격에 적합한 배열 신호처리 기술의 개발이 필요하다. IMT-2000 시스템으로써 대표적으로 논의되고 있는 cdma2000 규격에서는 송신 빔 형성기를 구성하기 위해서 하향링크 채널 추정을 목적으로 한 보조 파일럿 (auxiliary pilot)을 사용하도록 권고하고 있다[1]. 한편 WCDMA 규격에서는 스마트 안테나를 선택 사항으로 하고 있으며, 송신 다이버시티 기법을 제안하고 있다[2]. 아울러 두 방법 모두  $10^6$ 대의 낮은 비트 오차율과 최대 2Mbps의 고속 데이터 전송을 제시하고 있다.

cdma2000과 WCDMA 시스템 모두 주파수 분할(FDD) 및 시분할(TDD) 통신을 할 수 있는 이중 모드를 지원하고 있다. 따라서 송신 빔 형성 기법들 역시 FDD와 TDD로 나누어 고려되어야 한다. 상향 및 하향링크의 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 상·하향링크 주파수가 서로 다르기 때문에 페이딩 채널 특성도 달라지게 되어 상향링크에서 얻어진 채널 정보를 하향링크에 직접 적용할 수 없는 문제점이 있다.

이를 위해 기존의 송신 빔 형성 기법 가운데 고정된 빔 형성 방법은 미리 정해진 방향으로 송신

빔을 형성하는 것으로 비교적 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있으나 성능이 낮다는 문제점이 있다. 하향링크의 채널 특성 추정을 요구하는 케환(feedback) 방법은 정확한 송신 빔을 형성할 수 있는 장점이 있지만 채널 특성이 빠르게 변화하는 경우 이를 추적하기 위해서는 빠른 케환율을 가져야 하는 단점이 있다. 이 문제점을 보완하기 위해 연구된 것이 채널 특성을 직접적으로 추정하는 것이 아닌 고유 부공간(subspace)을 추정하여 케환 하는 방법으로써 상대적으로 고유 부공간의 변화율이 낮다는 데 기인하고 있다. 이외에 상향링크와 하향링크의 주파수 변환을 이용한 방법 등이 제안되었다[3-8].

이상과 같이 각 방법들은 장점과 단점을 갖고 있으므로 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 기존의 송신 빔 형성 기법들을 연구하고 나아가 개선된 성능을 갖는 송신 빔 형성 알고리즘을 제안한다. 제안한 방법은 상향링크로부터 얻어진 방향 정보와 파워 스펙트럼을 이용하여 하향링크의 반송 주파수와 송신 안테나 간격에 적합하도록 공분산 행렬을 구성한 뒤 송신 빔 형성을 위한 계수 벡터를 계산한다. 제안한 방법은 Rayleigh 페이딩 채널 환경에서 시뮬레이션을 통해 그 성능을 기존의 방법들과 비교하고 검증하였다.

## II. 기존 하향링크에서의 송신 빔 형성 기법

본 절에서는 기존의 대표적인 하향링크에서의 송신 빔 형성 기법 가운데 채널 추정을 이용한 방법[5]등을 소개한다. M개의 송신 안테나와 K명의 사용자가 존재하는 그림 1과 같은 환경에서 임의의 k 번째 사용자를 위한 채널 벡터를  $a_k$ 라 하자.

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

여기서  $a_{ik}$ 는 i번째 안테나와 k번째 사용자 사이의 복소 채널 응답이다. 사용자가 K명이므로  $M \times K$  채널 행렬 A는 다음과 같다.

$$A = [a_1 \cdots a_k] \quad (2)$$

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

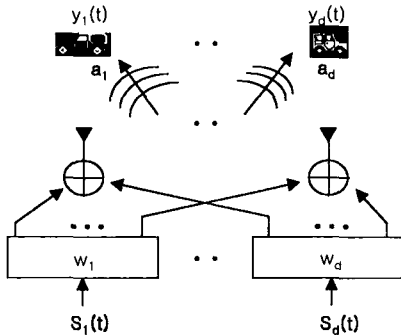


그림 1. 어레이 안테나를 이용한 송신 빔 형성  
Fig. 1 Transmit beamforming using array antenna.

$$W = [w_1 \cdots w_K] \quad (3)$$

만약 k번째 사용자가 수신한 j번째 신호의 크기를  $c_{jk}$ 라 하면 다음 식이 성립한다.

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

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

C는  $c_{jk}$ 를 원소로 하는 행렬로써 대각항은 원하는 신호의 레벨이며, 나머지 항은 크로스토크(crosstalk)의 크기이다. 따라서 완전한 송신 빔을 형성하기 위해서는 행렬 C는 항등(identity) 행렬 I와 같아야 한다.

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

따라서 위 식을 만족하는 계수 행렬 W는 pseudo-inverse(+)를 사용하면 다음과 같아진다.

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

그러나 일반적으로 기지국에서는 기지국과 사용자 사이의 채널 행렬 A를 알지 못하므로 이 채널 행렬 A를 추정하기 위해 기지국에서 probing 신호를 사용자에게 송신하고, 사용자가 수신한 신호를 다시 기지국으로 반환하여 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 신호로는 복소 지수 신호를 사용할 수 있다. 이 변환 방법의 문제점은 시간에 따라 변화하는 채널 벡터를 추적

하기 위해 높은 궤환 데이터 전송률을 가져야만 한다는 것이며, 특히 사용자가 고속으로 이동할 때 지속적으로 변화하는 채널을 추정하기 위하여 궤환율이 높아야 한다.

Winters 등은 송신 빔 형성을 위해 먼저 기지국에서 수신한 데이터로부터 공분산 행렬을 구하고 이를 이용하여 사용자 신호의 입사각을 추정하는 방법을 제안하였다[7]. 이때 입사각 추정을 위해서 일반적으로 고 분해능 기법으로 알려진 MUSIC, ESPRIT등을 사용할 수 있으며, 추정된 입사각을 이용해 조향(steering) 벡터를 구성할 수 있다. 이 조향 벡터를 하향링크 빔 형성을 위한 계수로 사용한다. 이 방법은 원하는 사용자와 다른 사용자가 근접해 있는 경우 다른 사용자가 송신 빔의 주빔(mainlobe)내에 놓이게 되어 성능이 떨어진다.

이외에도 하향링크에서 쓰여지게 될 최적화된 계수 벡터를 구하기 위해 상향링크에서 원하는 성분에 대한 공분산 행렬과 원하지 않는 성분의 공분산 행렬을 구한 뒤 일반화된 고유치 문제(Generalized Eigenvalue Problem)를 풀어 최적 계수 벡터를 구하는 방법이 연구되었다. 이 방법은 특히 CDMA 시스템에 적용되어 연구가 이루어졌다.

### III. 제안한 송신 빔 형성 알고리즘

본 논문에서는 상향링크에서 얻어진 사용자의 방향과 스펙트럼 정보를 이용하여 송신 빔을 형성하는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법을 설명하기 위하여 K명의 사용자가 존재하고 사용자는 각각 L개의 다중 경로를 갖는다고 가정한다. 이때 상향링크에서 어레이 안테나로 수신한 신호 벡터  $x(t)$ 는 다음과 같이 모델링 된다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^K \sum_{l=1}^L \sqrt{P_{l,i}} s_i(t - \tau_{l,i}) e^{j\phi_{l,i}} a_{l,i} + n(t) \quad (8)$$

여기서,  $P_{l,i}$ ,  $\tau_{l,i}$ 와  $\phi_{l,i}$ 는 각각 i-번째 사용자 l-번째 다중경로의 평균 파워, 전달지연시간과 위상이다.  $n(t)$ 는 가우시안 잡음 벡터이며,  $a_{l,i}$ 는 다음 식 (9)와 같이 주어지는 i-번째 사용자의 l-번째 다중경로 방향에 대한 방향 벡터를 나타낸다.

$$a_{l,i} = [1 e^{j2\pi d f_u \sin \theta_{l,i} / c} \dots e^{j2\pi (M-1) d f_u \sin \theta_{l,i} / c}]^T \quad (9)$$

위 식에서 d는 안테나 간격,  $f_u$ 는 상향링크 주파수이며, c는 전파 속도이다. 그리고  $\theta_{l,i}$ 는 어레이 수직면을 기준으로 한 i-번째 사용자의 l-번째 다중경로로 도달되는 신호의 입사각이다. 이제 하향링크 주파수  $f_d$ 에 대한 i-번째 이용자에 대한 공분산 행렬은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$R_i = \sum_{l=1}^L P_{l,i} a_{l,i} a_{l,i}^H \quad (10)$$

이 식은 원하는 사용자의 방향 벡터 외적과 평균 전력의 곱으로 이루어져 있다. 평균 전력은 상향링크에서 수신된 신호의 스펙트럼을 추정하여 사용할 수 있으며, 본 논문에서는 Bartlett 스펙트럼 추정 방법을 사용하였다. 위와 같은 방법으로 i-번째 이용자에 대한 간섭 신호의 공분산 행렬을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$M_i = \sum_{j=1, j \neq i}^K R_j \quad (11)$$

그러나 이 행렬은 불완전하기 때문에, 역행렬을 구할 때 심각한 성능 저하를 가져올 수가 있다. 그래서 이를 보상해 주기 위해서 실제 간섭신호 및 잡음 신호와 같은 부공간을 차지하는 공분산 행렬을 다음과 같이 구한다.

$$M_i = \sum_{j=1, j \neq i}^K R_j + \epsilon I \quad (12)$$

행렬  $M_i$ 는 i-번째 사용자를 원하는 사용자라 할 때 그 나머지 사용자 방향 벡터의 외적으로 구성된 행렬이며, 이 행렬은 실제 간섭 신호의 행렬과 같은 부공간을 차지한다. 식 (12)에서 우변의 두 번째 항은 가우시안 잡음을 모델링 하며, 아울러 역행렬 계산을 효율적으로 하게 된다. 가중치 계수 벡터를 구하기 위해 i-번째 이용자에 전송된 신호 대 잡음비  $SINR_i$ 를 최대화하는 기준을 사용하도록 한다.

$w_i$ 를 i-번째 사용자로의 송신 빔 형성을 위한 가중치 벡터라 할 때 이 기준의 해는 다음과 같다.

$$w_i = M_i^{-1} a_i \quad (13)$$

결국 가중치 계수 벡터는 다른 사용자와는 서로 직교하는 부공간으로 사상(mapping)하게 되어 원하

는 사용자의 방향으로만 송신 빔을 형성할 수 있도록 한다. 이는 다중 경로 환경으로 확장할 있는데 상향링크로부터 얻어진 각 다중경로 정보를 이용하여 필요한 finger 수만큼 독립된 송신 빔을 형성한다.

#### IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과 고찰

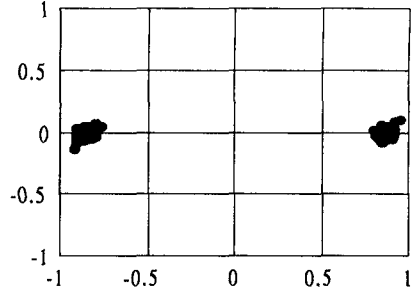
Rayleigh 페이딩 CDMA 채널에서 제안된 기법에 대한 성능을 고찰하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 시행하였다. 이때 안테나는 각 간격을 반파장으로 가지는 고정된 선형 배열로 하였으며, 사용자는 5명이고 각각에 대해서 직접 경로와 함께 두 개씩의 다중 경로를 가진다고 가정하였다. 또한 perfect power control을 가정하였으며, 상향링크의 반송 주파수는 1.95 GHz로 하고 하향링크의 반송 주파수는 2.14 GHz로 가정하였다. 표 1과 표 2에 각각 시뮬레이션에 사용된 파라메타와 환경에 대해 정리하였으며, 입사각은 어레이 축을 기준으로 하였다. 시뮬레이션에서는 기존의 채널 추정을 사용하는 방법과 상향링크에서 사용자 신호의 평균 파워를 최대화하는 방법을 제안된 방법과 비교하였다.

표 1. 시뮬레이션을 위한 파라메타  
Table 1. Parameters for simulation

파라메타	사용 값
안테나 수	6
사용자 수	5
각 사용자당 다중경로 수	2
chip rate	3.6864 Mcps
data rate	460.8 kbps
modulation	BPSK
oversampling (samples/chip)	8
채널 모델	Jake's model
mobile 이동 속도	100 km/h

표 2. 시뮬레이션에서 사용자 환경  
Table 2. User environments in simulation

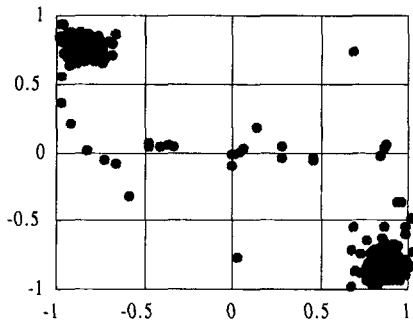
		입사각 (도)	직접경로에 대한 상대 크기	지연시간 (chips)
사용자 #1	직접경로	80	1	-
	다중경로 #1	10	0.9	3/8
	다중경로 #2	15	0.8	9/8
사용자 #2	직접경로	100	1	-
	다중경로 #1	20	0.9	3/8
	다중경로 #2	25	0.8	9/8
사용자 #3	직접경로	120	1	-
	다중경로 #1	30	0.9	3/8
	다중경로 #2	35	0.8	9/8
사용자 #4	직접경로	140	1	-
	다중경로 #1	40	0.9	3/8
	다중경로 #2	45	0.8	9/8
사용자 #5	직접경로	160	1	-
	다중경로 #1	50	0.9	3/8
	다중경로 #2	55	0.8	9/8



(c)

그림 2. 성상도, (a) 사용자 신호의 파워를 최대화하는 방법, (b) 채널 추정 이용법, (c) 제안된 방법

Fig. 2. Constellations, (a) user power maximizing method, (b) channel estimation method, (c) proposed method



(a)

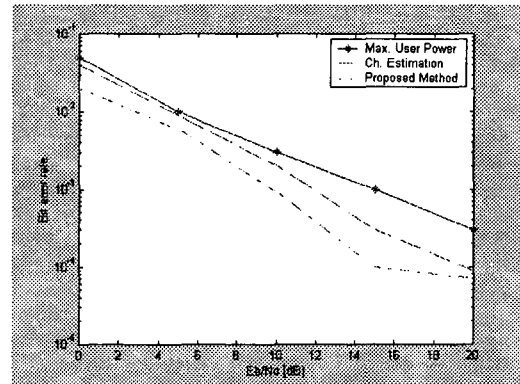
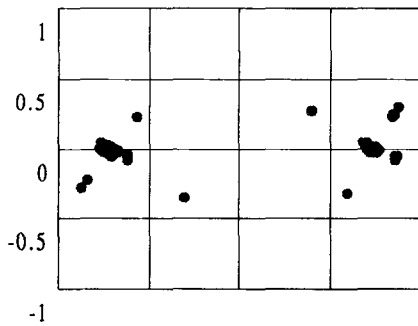


그림 3. 비트 오차율 곡선

Fig. 3. BER curves



(b)

그림 2는  $E_b/N_0$ 가 10 dB인 경우 성상도 (constellation)를 나타내었다. 그림은 첫 번째 사용자를 원하는 사용자로써 기준으로 한 것이다. 빔 패턴 측면에서 제안된 방법의 패턴에서 다른 사용자의 정확한 방향으로 이득을 낮추어줌으로써 신호 대 잡음비를 개선하기 때문에 성상도에서도 같은 결과를 볼 수 있다. 즉 제안된 방법은 BPSK 신호로써  $\pm 1$  근처에 몰려 있으나 다른 방법들은 상대적으로 편차가 큰 것을 볼 수 있다. 그림 3에는  $E_b/N_0$ 에 따른 비트 오차율(BER)을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 상향링크에서 사용자 신호

의 파워를 최대화하는 방법은 하향링크 주파수와의 부정합으로 인해 비교 대상 가운데 성능이 가장 좋지 않게 나타났으며, 제안된 기법이 BER 성능이 기존의 방법에 비해서 우수함을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 상향링크와 하향링크의 채널 특성이 다른 FDD 환경에 적합한 송신 빔 형성 방법에 대해 연구하였다. 기존의 방법 가운데 채널 추정을 위한 궤환 방법은 비교적 정확한 송신 빔을 형성할 수 있는 장점이 있지만 채널 특성이 빠르게 변화하는 경우 이를 추적하기 위해서는 빠른 궤환율을 가져야 하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이런 문제점을 보완하는 알고리즘을 제안하였으며, 이는 상향링크로부터 얻어진 스펙트럼 및 방향과 같은 사용자 정보들을 이용한다. 시뮬레이션 결과에서는 기존의 방법들과 비교, 분석하여, 제시된 방법이 기존의 방법에 비해서 향상된 성능을 보임을 알 수 있었다.

앞으로 연구된 방법의 실제 적용성 검토와 아울러 실시간 처리를 위한 하드웨어 구현 방법에 대해 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 참고 문헌

[1] Telecommunications Industry Association (TIA) TR45.5.4, "The cdma2000 ITU-R RTT Candidate Submission," available from [http://www.itu.int/imt/2-radio-dev/proposals/cdma2000\(0.18\).pdf](http://www.itu.int/imt/2-radio-dev/proposals/cdma2000(0.18).pdf), 1998.

[2] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS*, Wiley, 2000.

[3] E. Tiirila and J. Ylitalo, "Performance evaluation of fixed-beam beamforming in WCDMA downlink," *Proc. VTC2000*, pp.700-703, May 2000.

[4] S.S. Jeng, G.T. Okamoto, G. Xu, H.P. Lin and W.J. Vogel, "Experimental evaluation of smart antenna system performance for wireless communications," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.46, no.6, pp.749-757, June 1998.

[5] D. Gerlach and A. Paulraj, "Adaptive

transmitting antenna arrays with feedback," *IEEE Signal Proc. Letters*, vol.1, no.10, pp.150-152, Oct. 1994.

[6] A. Czulwik and T. Matsumoto, "Downlink beamforming for frequency-duplex systems in frequency-selective fading," *Proc. VTC 2000*, pp.695-698, May 2000.

[7] 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.

[8] J.S. Thompson, J.E. Hudson, P.M. Grant and B. Mulgrew, "CDMA downlink beamforming for frequency selective channels," *Proc. VTC99*, pp.200-203, May 1999.

이 용 주(Yong-Joo, Lee)

2000년 2월 한국해양대학교 전파공학과(공학사)  
2000년 3월~현재 한국해양대학교 전파공학과 대학원 재학중(석사과정)  
※주요관심분야 : 통신 신호처리, 수중 통신

양 승 용(Seung-Yong, Yang)

2000년 2월 한국해양대학교 전파공학과(공학사)  
2000년 3월~현재 한국해양대학교 전파공학과 대학원 재학중(석사과정)  
※주관심분야 : 통신 신호처리, CPLD 설계

김 기 만(Ki-Man, Kim)

1988년 연세대학교 전자공학과(공학사)  
1990년 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
1995년 연세대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
1995년~1996년 연세의료원 의용공학교실  
1996년~현재 한국해양대학교 전파공학과 조교수  
※주관심분야 : 오디오 신호처리, 스마트 안테나, 소나 신호처리, 실시간 DSP 구현 등