

WCDMA 역방향 링크에 대한 빔포밍 적용에 관한 연구

이 제 식, 김 중 윤, 장 태 규, *김 제 화
중앙대학교 전자전기공학부. *삼성전자

A Study on the Reverse Link Beamforming for the WCDMA System

Jae-Sik Lee, Chong-Yun Kim, Tae-Gyu Chang, *Jae-Hwa Kim
School of Electrical Engineering, Chung-Ang University. *Samsung Electronics, Inc.
E-mail : ultrapink@joins.com

Abstract

본 논문은 WCDMA 시스템의 역방향 링크에서의 빔포밍 적용에 관하여 기술하였다. 제안된 빔포밍 구조는 제어채널의 파일럿 심볼을 이용한 빔포밍 계수 계산과 데이터 채널에 적용하는 분리구조를 가지고 있다. 적용 빔포밍의 대표적 방식인 LMS 알고리즘과 steering 알고리즘을 적용하여 성능 분석과 시뮬레이션을 수행하였으며, 다양한 환경 변수에 따른 시뮬레이션 결과는 빔포밍 알고리즘의 구현과 설계에 있어 중요한 지침을 주리라 기대된다.

I. 서론

빔포밍(beamforming) 기술은 셀룰라 무선 이동통신 시스템에서 간섭신호를 줄여주고 잡음의 비율을 낮추어 줌으로써 전력 효율을 높여줄 뿐 아니라, 기지국당 수용 범위와 가입자 용량을 증대시킬 수 있는 유용한 기법이다[1]. 현재 상용화를 앞두고 있는 제 3 세대 이동통신 표준의 대표인 IMT-2000 WCDMA 시스템에서도 진보적인 안테나 기술을 적용하기 위한 구조를 반영하고 있어 이의 응용을 위한 독자적인 기술 개발에 대하여 상업적 기대효과가 매우 높다하겠다.

이러한 유용성에도 불구하고 현재 제시되어 있는 빔포밍 알고리즘들은 구현 측면의 경제성에 있어서 매우 제한적인 형태라고 할 수 있다. 대표적인 최적 알고리즘인 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response)이나 LCMV(Linear Constraint Minimum Variance) 알고리즘을 구현하기 위해서는 안테나의 개수에 비례하는 차수의 고유치 문제와 역행렬 연산을

수행해야 하는 등의 고도의 수치 연산을 필요로 하므로 낮은 성능의 마이크로 컨트롤러를 통해 경제적으로 구현하는 것이 매우 어렵다. 이에 본 논문에서는 구현 측면의 경제성을 고려하여 연산량 측면에서 여타 알고리즘에 비하여 유리하면서도 최적의 성능을 보장하는 LMS 알고리즘과 최적화의 과정을 생략하고 사용자 위치 정보만을 DFT 또는 FFT를 이용하여 빔포밍 계수를 결정하는 steering 빔포밍을 WCDMA 빔포밍 알고리즘으로 적용할 때의 성능을 분석하는 연구를 수행하였다.

이를 위하여 WCDMA 디지털 빔포밍 적용구조를 제시하고 두 가지의 알고리즘을 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 여러 설계 요소들에 대한 성능을 비교하여 실제 응용을 위한 설계지침을 얻는 연구를 수행하였다. 2장에서는 빔포밍 알고리즘 적용을 위한 신호를 모델링 하고 이러한 기본 신호 모델을 대상으로 빔포밍을 적용하는 구현구조를 제시한다. 3장에서는 빔포밍 알고리즘에 대하여 제시하였으며 4장에서 제시한 빔포밍 적용구조들에 대한 동작 시뮬레이션 결과를 제시하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. WCDMA 시스템 빔포밍 적용구조

본 절에서는 기저 대역 빔포밍을 WCDMA 시스템 역방향 링크에 적용하는 구조에 대하여 기술하였다. 빔포밍의 적용구조를 그림 1에 나타내었으며, 빔포밍 적용구조는 크게 채널 분리 블록, 빔포밍 계수 계산부, 빔포밍 적용부와 SINR을 추정하는 블록으로 구분되어진다.

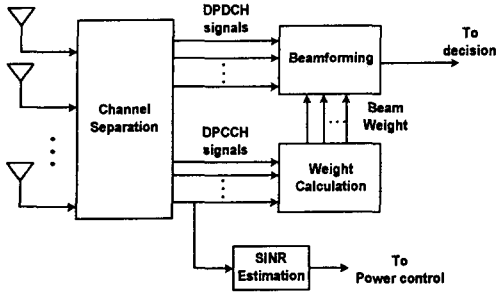


그림 1. WCDMA 시스템에 대한 기저대역 빔포밍 적용 구조도

WCDMA에서의 k-번째 사용자의 송신 신호, $r^k(t)$,는 채널 신호, $d^k(t)$ 와 복소수 혼합코드 $s^k(t)$ 의 복소수 곱으로 나타낼 수 있다. 채널 신호 $d^k(t)$ 는 데이터 채널(DPDCH)의 신호, $d_D^k(t)$ 와 제어 채널(DPCCH)의 신호 $d_C^k(t)$ 가 각각의 채널화 코드 $c_D^k(t)$ 와 $c_C^k(t)$ 로 확산된 신호를 실수 및 허수로 갖는 신호이다.

$$d^k(t) = d_D^k(t) c_D^k(t) + j d_C^k(t) c_C^k(t) \quad (1)$$

$$r^k(t) = s^k(t) d^k(t)$$

여기서, $c_D^k(t)$ 와 $c_C^k(t)$ 는 직교변환산비코드로서, 두 코드는 서로 직교하며 서로 다른 확산비를 가지더라도 이러한 특성을 유지하도록 설계된 코드이다.

안테나 간격이 수신 신호 파장의 1/2인 선형 어레이 안테나를 대상으로 하면, 입사각 θ_k 를 가지고 수신되는 사용자 신호의 안테나 응답 벡터는 $\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-j\pi \sin(\theta)}, \dots, e^{-j(M-1)\pi \sin(\theta)}]^T$ 로 나타낼 수 있으며, 플랫 페이딩과 부가 잡음을 포함하여 식 (2)와 같이 안테나 수신 신호 벡터를 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k(t) e^{j\phi_k(t)} r_k(t - \tau_k) \mathbf{a}(\theta_k) + \boldsymbol{\eta}(t) \quad (2)$$

여기서 $\boldsymbol{\eta}(t)$ 는 부가 잡음을 나타내고, $\alpha_k(t)$ 와 $\phi_k(t)$ 는 각각 Rayleigh 확률분포를 가지는 multiplicative distortion과 Doppler shift에 의한 uniform 분포의 phase distortion으로써 페이딩의 영향을 나타내는 항이다. τ_k 은 k-번째 사용자 신호의 경로 지연을 나타낸다.

수신된 안테나 신호로부터 기저 대역 신호의 추출은 송신의 역과정으로 혼합코드의 역 확산과 채널화 코드의 역 확산 순으로 수행한다. DPDCH 복조 신호

$x_D^k(t)$ 와 DPCCH 복조 신호 $x_C^k(t)$ 는 식 (3)과 (4)에 나타낸 것같이 안테나 수신 신호에 직교 성질을 가지는 채널화 코드로 I-단과 Q-단을 동시에 역확산 시킴으로 상대 채널의 성분을 제거시켜 얻을 수 있다.

$$x_D^k(n) = \int_{(n-1)T_D + \tau_k}^{nT_D + \tau_k} \mathbf{x}(t - \tau_k) s_k^*(t - \tau_k) c_D^k(t - \tau_k) e^{j\phi} dt \quad (3)$$

$$x_C^k(n) = \int_{(n-1)T_C + \tau_k}^{nT_C + \tau_k} \mathbf{x}(t - \tau_k) s_k^*(t - \tau_k) c_C^k(t - \tau_k) e^{j\phi} dt \quad (4)$$

여기서 T_D , T_C 는 각각 데이터 채널과 제어 채널의 심볼 주기를 나타낸다. 이러한 방식의 복조 기법을 적용한 채널 분리 구조를 그림 2에 나타내었다[2].

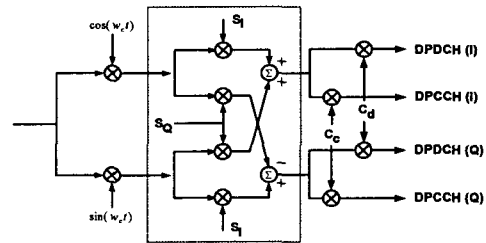


그림 2. WCDMA 시스템에서의 채널 복조 구조

빔포밍 적용은 식 (5)와 같이 기저 대역에서 DPDCH 복조 신호 $x_D^k(n)$ 에 대해 복소수 빔포밍 계수 $w(n)$ 를 곱함으로써 수행된다.

$$y(n) = w^H(n) x_D^k(n) \quad (5)$$

빔포밍 계수 $w(n)$ 는 DPCCH 복조 신호 $x_C^k(n)$ 의 슬롯 구간마다 연속적으로 반복되는 파일럿 정보를 이용하여 계산되며, 현재 슬롯 구간에서 계산된 빔포밍 계수는 DPDCH 신호의 다음 슬롯 구간부터 적용되는 구조를 가진다. 빔포밍 알고리즘은 최적화 기법의 대표적인 방식인 LMS 알고리즘과 DOA 기반의 DFT 알고리즘을 대상으로 하였다.

III. 빔포밍 알고리즘

본 절에서는 본 연구에서 제시한 두 가지의 빔포밍 알고리즘에 대하여 기술하고 있으며, 알고리즘으로는 계수 최적화 과정을 포함하고 있는 최적 기법중에 대표적인 방법인 LMS-based 빔포밍과 계수 최적화 과정이 필요 없이 사용자의 위치 정보만을 필요로 하는 steering 방식의 DFT-based 알고리즘 빔포밍을 채택하였다.

3.1 LMS 기반의 빔포밍 알고리즘

WCDMA 역방향 링크에 대한 빔포밍 적용에 관한 연구

LMS 알고리즘을 기초한 한 빔포밍 기법은 최적 알고리즘의 한 형태로 여타의 블록단위 최적화 알고리즘들에 비해 역행렬 연산이나 고유치 계산 등과 같은 복잡한 연산을 필요로 하지 않기 때문에 구현의 복잡도와 계산량을 줄일 수 있다. 이와 같은 기저대역 LMS 빔포밍 기법의 기본 구성도를 그림 3에 나타내었다[3].

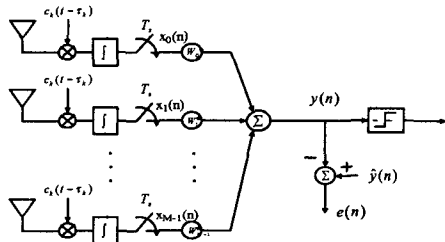


그림 3. 본 연구에서 적용한 LMS 기반의 빔포밍 알고리즘의 기본 구성도

LMS 빔포밍에서 계수의 계산은 기저대역의 안테나 신호, $\mathbf{x}(n)$ 와 빔포밍 계수, \mathbf{w} 를 곱하여 조합한 빔포밍 출력신호 $y(n)$ 와 기준신호 $\hat{y}(n)$ 의 오차신호를 통해 이루어진다. 이러한 계수의 갱신은 다음의 식 (8)과 같다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \frac{\mu}{2} \mathbf{x}_c^k(n) e^*(n) \quad (8)$$

$$e(n) = y(n) - \hat{y}(n), \quad y(n) = \mathbf{w}^H(n) \mathbf{x}_c^k(n)$$

여기서 μ 는 스텝크기, $\mathbf{x}(n)$ 은 안테나 신호 벡터를 나타낸다.

3.2 DFT 기반의 빔포밍 알고리즘

DFT(Discrete-Fourier Transform) 기반의 빔포밍 기법은 DFT 또는 FFT(Fast Fourier Transform)을 통하여 사용자의 위치 정보를 추정하고 이를 통하여 사용자의 방향으로 빔을 형성하는 기법이다. 이는 기존에 적은 수의 간섭 사용자의 널링을 목적으로 하는 시스템과는 달리, DS-CDMA 시스템에 적용할 빔포밍 알고리즘은 수신신호에서 전체 간섭 사용자의 평균적인 수신전력을 낮추어 SINR을 증대시키는 형태의 알고리즘이 유효하다 할 수 있다.

안테나 신호벡터를 안테나 요소의 인덱스를 축으로 하여 이산 푸리에 변환을 취하면 사용자 신호의 위상에 해당되는 주파수 값에서 최대의 값을 가지게 되고 이 때의 주파수 성분이 사용자의 위치정보임을 알 수 있다. 간섭에 의한 사용자 위치추정의 오차를 최소

화하기 위해서 안테나 신호를 일정 간격동안 시간 평균을 취하여 위치추정에 사용하였다.

$$X_k(\phi) = \sum_{m=0}^{M-1} x_{k,m}(n) e^{-j\phi m} \quad (9)$$

$$\pi \sin(\hat{\theta}_k) = \hat{\phi}_k = \max_{\phi} |X_k(\phi)| \quad (10)$$

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{a}^*(\hat{\theta}_k) = [1, e^{-j\pi \sin(\hat{\theta}_k)}, \dots, e^{-j(M-1)\pi \sin(\hat{\theta}_k)}]^T \quad (11)$$

여기서, $x_{k,m}(n)$ 은 기저 대역 안테나 신호, $\hat{\phi}_k$ 는 추정된 사용자의 위치가 되며, \mathbf{w}_k 는 계수 벡터를 나타낸다. 이와 같이 DFT를 기초한 steering 빔포밍의 구성도를 그림 4에 나타내었다.

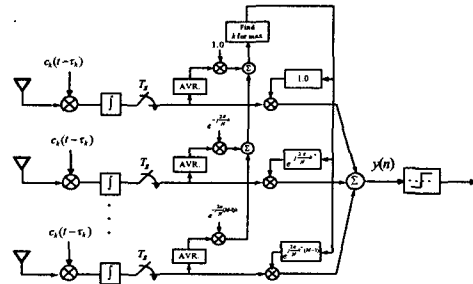


그림 4. 본 연구에서 적용한 DFT 기반 빔포밍 알고리즘의 기본 구성도

IV. WCDMA 빔포밍 동작 시뮬레이션 및 검토

본 절에서는 본 논문에서 제시한 빔포밍 알고리즘들의 성능을 비교분석하고 실제 응용을 위한 설계지침을 얻고자 DS-CDMA 빔포밍 시스템의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 동작 주기와 관련된 시뮬레이션 변수들을 표 5-2에 나타내었다.

표 4-1. 시뮬레이션 변수설정

Parameters		Simulation values
Operation rate		8*chip rate
Beamforming rate	LMS	symbol period update, slot period application
	Steering	1.5 KHz, every slot
Power control		1.5 KHz, every slot
Fading		sum of 10 sinusoid, Rayleigh dist.

시뮬레이션의 수행은 소비전력, 비트오율 등 셀룰라 이동통신 시스템의 주요 설계변수들과 성능과의 관계를 중심으로 이루어졌으며, 수신신호의 페이딩을 결정하는 사용자의 이동속도를 구분하여 각 상황에 대한 적절한 성능 설정으로 실제성을 높이도록 하였다. 본 논문에서 모델링한 DS-CDMA 시스템의 상세한 설계 변수들은 IMT-2000 WCDMA 표준 시스템의 값을 최대한 반영하도록 하였다.

심볼 단위의 LMS 알고리즘을 적용하여 각 페이딩 속도별로 BER을 얻은 결과를 그림 5에 나타내었다. Steering 빔포밍에 대한 성능 시뮬레이션의 결과를 그림 6에 나타내었으며, 이는 사용자의 속도가 20 [Km/h]인 페이딩 환경에 대하여 안테나의 수를 $M=4, 8, 16$ 으로 증가 시켜 빔포밍을 적용시켰을 때 BER 성능을 나타내며 전력제어만을 적용하였을 경우 BER 성능과 함께 비교하여 나타낸 결과이다.

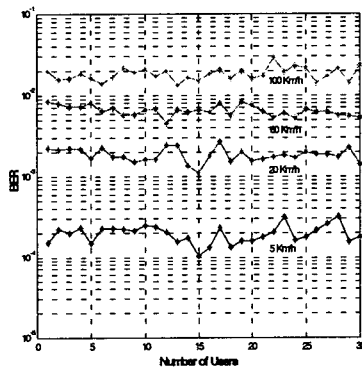


그림 5. 심볼단위 LMS 빔포밍의 성능 시뮬레이션 결과. $M=4$

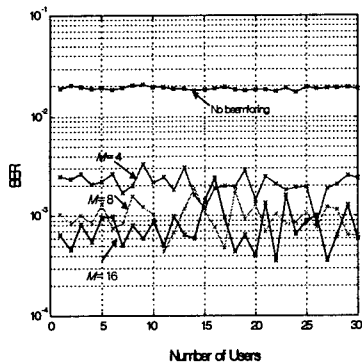


그림 6. Steering 빔포밍의 성능 시뮬레이션 결과

안테나의 개수를 증대시켜 빔포밍을 수행하면 BER 성능이 증대 되는 것을 확인할 수 있다. BER 성능 증대를 증가의 SNR로 환산한 결과를 보면 평균적으로 페이딩이 약할 때 성능의 개선량이 높다 할 수 있다. 그러나 일정한 수 이상의 안테나 배열을 적용한 경우는 안테나를 늘려주는 것에 비례하여 BER 성능의 개선이 비례하지는 않는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 실제 시스템의 설계에 있어서는 구현의 복잡도와 성능 측면에서의 응용 목적에 맞는 최적의 안테나 개수의 설정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 IMT-2000 WCDMA 시스템의 기지국에서 적용하기 위한 역방향 링크 빔포밍 기법에 대하여 연구하였다. WCDMA 시스템에 적용하기 위한 빔포밍 알고리즘으로는 계산량 측면에서 실질적인 응용이 가능한 LMS 알고리즘과 steering 알고리즘을 선정하여 이를 적용한 빔포밍 적용구조를 제시하였다. LMS 알고리즘을 적용한 빔포밍 기법은 심볼 단위 계산 슬롯 단위 적용을 기본으로 하여 이의 동작과 성능을 확인하였다. 사용자의 수가 이용하고자하는 안테나의 수에 비하여 월등히 높은 WCDMA 시스템의 환경에서는 근본적으로 정교한 널링을 통한 간섭제거의 기능을 기대할 수는 없다. 따라서 사용자의 위치 정보만을 이용한 steering 빔포밍이 WCDMA 시스템에서는 유효한 것으로 확인되었다. 향후 이러한 연구 결과를 바탕으로 실제적인 시스템의 파라미터들을 더욱 정교하게 반영하는 시뮬레이션 모델을 얻는 연구가 필요하다 하겠다. 또한 수신기의 구조를 다중경로 다이버시티를 고려한 RAKE 수신구조 적용에 따른 성능의 변화를 해석적으로 유도할 필요가 있으며, 코딩 등의 영향을 반영한 성능 및 용량의 이득을 해석함으로써 실제적인 시스템의 설계 지침을 제공할 필요가 있다.

Reference

- [1] Barry D. Van Veen and Kevin M. Buckley, "Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering," IEEE ASSP Magazine, Vol. 5, Iss. 2, pp. 4-24, Apr. 1988.
- [2] Harry Holma and Antti Toskala, *WCDMA FOR UMTS-Radio Access For Third Generation Mobile Communications*, Wiley, 2000
- [3] LAC C. GODARA, "Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II," Proc. of IEEE, Vol. 85, NO. 7, July 1997.