

W-CDMA용 Systolic 어레이 구조를 갖는 상향링크 빔형성기법 성능 분석

이호중, *서상우, 이원철
승실대학교 정보통신전자공학부, *㈜Nexpilot
전화 : 02-826-7980 / 팩스 : 02-823-7980

Performance Analysis of Uplink Beamforming using Systolic Array Structure in W-CDMA Systems

Ho-Joong Lee, *Sang-Woo Seo, Won-Cheol Lee
School of Electronic Engineering, Soongsil University, *Nexpilot
roundoff@amcs.ssu.ac.kr

본 논문은 승실대학교 교내 연구비 지원 결과임

요약

본 논문에서는 W-CDMA(Wide-Code Division Multiple Access)용 Systolic 어레이 구조를 갖는 상향링크 빔형성기법에 대한 성능 분석을 하였다. 적응 어레이 안테나와 Systolic 구조의 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response) 알고리즘을 사용하여 구해진 가중치 벡터를 이용하여 원하는 사용자의 방향으로 빔을 형성하고 원하지 않는 사용자의 방향으로 null을 형성하는 공간필터를 적용하여 W-CDMA 상향링크에서 다중 경로 페이딩과 다중 접속 간섭의 증가에 따른 수신 성능을 분석하였다. 그리고, 안테나 시스템에서 사용되는 가중벡터를 갱신하기 위해 Systolic 구조의 MVDR과 역방향 파일럿 채널을 이용하는 QR-RLS(QR-Recursive Least Squares) 알고리즘을 적용하였다. 본 논문에서는 빔형성에 사용하기 위한 역행렬의 계산과정에 Systolic 어레이 구조를 적용하여 병렬적인 고속처리가 가능한 방법과 효율적인 계산과정을 위해 MVDR과 QR-RLS 알고리즘을 적용한 공간 필터링의 성능을 소개한다.

1. 서론

이동 통신 시스템의 사용자가 증가함에 따라 기존의 CDMA 방식을 채용한 이동통신 시스템은 용량이 포화에 이르게 되었으며, 제한된 스펙트럼의 사용 효율을 극대화 하기 위해 최대의 시스템 용량을 얻을 수 있는 수신기법에 대한 연구가 진행되고 있다[1]. 또한, 무선 통

신 시스템의 수요 증가는 점차 가입자나 운전자, 제조업체 모두에게 고품질, 고용량의 서비스를 요구하며, 다양한 멀티미디어 서비스 제공을 목표로 하고있다. 따라서 향후 광대역 CDMA 시스템에서는 원하는 사용자 신호 성분의 전력은 최대화하고 간섭신호 및 주변잡음 신호 성분의 전력은 최소화함으로써 시스템 용량 증가 및 수신신호의 에러발생 확률을 낮추는 고성능 무선 이동통신 시스템의 수신 신호처리 알고리즘이 요구된다. 이러한 요구 사항을 해결하고 고품질, 고속 데이터 전송 실현을 위해 제안되고 있는 기술 중 하나가 스마트 안테나 기술이다. 빔형성기 기술은 적응 배열 안테나(Adaptive Array Antenna)를 이용한 기술로서 무선 이동통신 시스템 상에서 기지국과 각 가입자간에 송수신 특성을 통신이 이루어지는 방향으로서는 이득을 최대화하고 여타의 방향으로서는 이득을 최소화함으로써 움직이는 가입자에 따라서 최적의 빔패턴을 조정하여 통신 파라미터를 최적화 함으로서 통신품질의 향상과 용량을 증가시킬 수 있다. 본 논문은 W-CDMA용 스마트 안테나 시스템의 빔형성기에서 사용되는 가중벡터를 갱신하기 위해서 배열 안테나에 입사되는 스냅샷 벡터들을 Systolic 구조를 갖는 MVDR 알고리즘을 기반으로 한 공간필터에 적용하였다. 여기서 MVDR기법은 각 안테나 소자의 출력에 복소 가중치를 곱하여 원하는 사용자의 신호방향으로 안테나의 빔을 형성하도록 하고 간섭 성분들의 입사 방향들로 null을 발생시키는 공간 필터링 효과를 사용한 것이다[2].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 안테나 어레이의 입사신호 모델링을 소개하고 3장에서는 MVDR을 4장에서는 학습을 위한 파일럿 심볼들을 기반으로 한

QR-RLS 기법을 이용하여 최적 가중치 계산 방법에 관하여 기술한다. 마지막으로 모의 실험과 결론으로써 W-CDMA 시스템을 기본으로 다중경로 페이딩 채널과 다중 사용자 접속간섭이 존재하는 상황에서 성능을 분석하였다.

II. 안테나 어레이를 이용한 입사신호 모델링

셀 내에 실제 k 명의 사용자가 존재하고 각 사용자가 M 개의 센서가 배열되어 있는 기지국으로 자신의 신호를 송신할 경우 배열 센서상의 입사 신호들은 다음과 같은 벡터 형태로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^{L_k} \alpha_{k,p} e^{j\phi_{k,p}} s_k(t - \tau_{k,p}) \mathbf{a}(\theta_{k,p}) + \mathbf{n}(t), s_k(t) = b_k(t) c_k(t) \quad (1)$$

k 번째 사용자에게 관계되는 시간 지연 $[\tau_{k,p}]_{p=1}^{L_k}$ 은 분별 가능한 L_k 시간지연 값들이며 poisson 분포를 갖는다. 식 (1)에서 안테나 배열에 M 개의 센서가 전개되었다면 이에 상응하는 방향벡터는 다음과 같이 주어질 수 있다.

$$\mathbf{a}(\theta_{k,p}) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j \frac{w_0 d \sin \theta_{k,p}}{c}} \\ e^{-j 2 \frac{w_0 d \sin \theta_{k,p}}{c}} \\ \vdots \\ \Lambda \\ e^{-j (M-1) \frac{w_0 d \sin \theta_{k,p}}{c}} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

여기서 w_0 는 반송 주파수이고 d 는 인접한 센서간의 간격이며 c 는 전파의 전달 속도이다. 그리고 $\theta_{k,p}$ 는 k 번째 사용자 신호의 p 번째 경로의 입사각이다. k 번째 사용자의 p 번째 다중경로 성분에 해당하는 복소 페이딩 계수 $\alpha_{k,p} e^{j\phi_{k,p}}$ 는 Rayleigh 분포를 갖고, 위상 $\phi_{k,p}$ 는 균일한 확률특성을 갖는다. 이 때 본 논문에서는 원하는 사용자를 첫 번째 사용자로 고려하고 시간 지연 $\tau_{1,l}, l=1 \rightarrow L_1$ 는 완벽하게 알고 있는 것으로 가정하였다. 또한 각 사용자에게 해당하는 지연시간 수는 모두 동일하다고 가정한다. 즉, $L_1 = L_2 = \dots = L_M = L$, 이 후 M 개의 병렬 상관기를 통과한 후, M 개의 출력벡터 $\mathbf{y}_{1,m}(t), m=1 \rightarrow M$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y}_{1,m}(t) = [y_{1,m,1}(t) \ \Lambda \ y_{1,m,L}(t)] \quad (3)$$

여기서 첫번째 성분은 $n-1$ 번째 심플 주기동안 센서의 출력과 첫번째 사용자에게 할당된 첫번째 다중경로 지연 시간이 고려된 PN sequence $c_1(t)$ 사이의 상관출력이다.

$$y_{1,m,1}(n) = \frac{1}{\sqrt{T_b}} \int_{(n-1)T_b}^{nT_b + \tau_{1,1}} x_m(t) c_1^*(t - \tau_{1,1}) dt \quad (4)$$

$$= \sqrt{T_b} \alpha_{1,1} e^{j\phi_{1,1}} b_1(n) a_m(\theta_{1,1}) + i_{m,1,1}(n) + n_{m,1,1}(n)$$

$a_m(\theta_{1,1})$ 는 원하는 사용자의 첫번째 다중경로 입사 방향 $\theta_{1,1}$ 에 대한 m 번째 센서의 복소응답 값이다. 식(4)에서 잡음성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_{m,1,1}(n) = \frac{1}{\sqrt{T_b}} \int_{(n-1)T_b}^{nT_b + \tau_{1,1}} n_m(t) c_1^*(t - \tau_{1,1}) dt \quad (5)$$

위의 식에서 잡음성분은 평균이 0이고 분산이 $\sigma_n^2 T_c$ 인 복소 가우시안 랜덤변수이다.

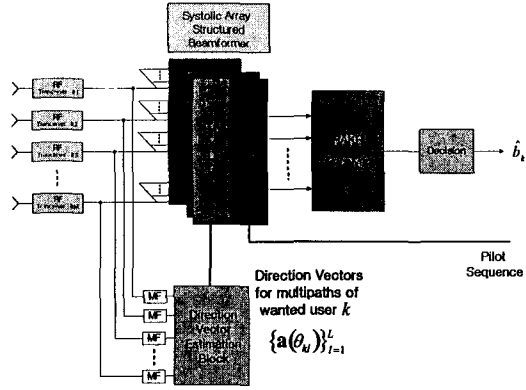


그림 1. Systolic 어레이 구조를 이용한 MVDR / QR-RLS 빔형성 처리과정

III. Systolic 어레이 구조의 MVDR 기법

Systolic 어레이 구조를 사용한 MVDR 공간필터 구조는 바운더리 (Boundary) 셀과 인터널 (Internal) 셀로 이루어져 있다. 마지막 인터널 셀에서 식 (6)과 같은 오차신호 $\mathbf{e}(n)$ 가 출력된다. 이 때 오차신호 $\mathbf{e}(n)$ 는 결국 MVDR 빔형성기 출력 $\mathbf{y}(n)$ 으로 여겨질 수 있다.[3]

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{X}(n) \mathbf{w}(n) \quad (6)$$

또한, 스냅샷 벡터 행렬 $\mathbf{X}(n)$ 은 칩들의 어레이 출력 신호 샘플들로 구성되는 n 개의 $1 \times M$ 행 벡터로 표현되고 다음과 같다.

$$\mathbf{X}(n) = \begin{bmatrix} x_1(t_1) & x_2(t_1) & \Lambda & x_M(t_1) \\ x_1(t_2) & x_2(t_2) & \Lambda & x_M(t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1(t_n) & x_2(t_n) & \Lambda & x_M(t_n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (8)과 식 (9)는 각각 원하는 사용자의 l 번째 다중경로를 위한 안테나 가중치 벡터와 빔형성 출력 벡터이며, \mathbf{w} 및 \mathbf{y} 는 전치 행렬을 의미한다.

$$\mathbf{w}_{1,l}^T(n) = [w_1^{1,l}(t_n) \ w_2^{1,l}(t_n) \ \Lambda \ w_M^{1,l}(t_n)] \quad (8)$$

$$\mathbf{y}_{1,l}^T(n) = [y(n) \ y(n-1) \ \Lambda \ y(n-m+1)] \quad (9)$$

MVDR 알고리즘은 출력 신호의 크기를 일정하게 유지하면서 간섭 신호와 잡음 신호 성분을 최소화 시킴으로써 원하는 사용자의 신호성분을 강조 시키는 방법으로 빔형성기의 출력 신호 전력은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$P(\mathbf{w}) = E[y_{1,l}(t_n) \cdot y_{1,l}(t_n)^H] = \mathbf{w}_{1,l}^H \mathbf{R}_x \mathbf{w}_{1,l} \quad (10)$$

식 (10)에서 \mathbf{R} 은 t_n 에서 추정된 칩 레벨에서 어레이

출력 벡터에 대한 공간 상호 상관 행렬이다. 그리고, Lagrange multipliers를 이용하여 최적의 가중치 벡터는 다음과 같은 수식으로 표현 할 수 있다.

$$\mathbf{w}_{i,l}^{opt}(n) = \frac{\mathbf{R}_x^{-1}(n)\mathbf{a}(\theta_{i,l})}{\mathbf{a}^H(\theta_{i,l})\mathbf{R}_x^{-1}(n)\mathbf{a}(\theta_{i,l})} \quad (11)$$

위의 식에서 $\mathbf{a}(\theta_{i,l})$ 은 원하는 사용자의 l 번째 다중 경로 성분 입사각에 대한 방향 벡터이며, MVDR기법의 제한 조건을 위해 사용된다. 식(11)에서 볼 수 있듯이 원하는 사용자의 l 번째 다중 경로를 위한 최적의 안테나 가중치 벡터 계산에 필요한 추정된 공간 상호 상관 행렬 $\mathbf{R}_x(n)$ 의 역행렬과 방향 벡터로 계산됨을 알 수 있다. 이후 l 개의 다중경로 성분들에 대한 빔형성 출력들은 RAKE 수신단의 입력으로 사용된다.

IV. Systolic 어레이 구조를 갖는 QR-RLS 빔형성 기법

무선 규격의 기지국 시스템상에서 역방향 링크에 제공되는 사용자의 파일럿 신호 혹은 원하는 사용자의 기준신호로 빔형성을 위한 최적의 계수벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{w}_{k,l}(u) = \mathbf{R}_x^{-1}(n)\mathbf{r}_{k,l}(n) \quad (12)$$

식 (12)에서 $\mathbf{w}_{k,l}(n)$ 는 k 번째 사용자의 l 번째 다중 경로 성분에 대한 빔형성기의 최적 가중 벡터이며, $\mathbf{R}_x(n)$ 는 배열안테나에 입사되는 스냅샷 벡터의 공간 상관 행렬이며 $\mathbf{r}_{k,l}$ 는 기준신호로 사용되는 k 번째 사용자의 l 번째 다중 경로 지연 시간이 고려된 칩 레벨의 확산된 파일럿 시퀀스와 배열 안테나 입사신호 벡터간의 상호 상관 벡터이다. 식 (12)에서 알 수 있듯이 최적 가중치 벡터를 계산하기 위해서는 스냅샷 벡터의 상호 상관 행렬의 역행렬 계산이 필수적이며, 입력되는 기저대역 성분의 스냅샷 벡터들을 표본화하고 이를 사용하여 공간 상관 행렬을 반복적으로 추정하기 위한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\mathbf{R}}_x(n) = \hat{\mathbf{R}}_x(n-1) + \mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n) \quad (13)$$

식 (13)에서 $\mathbf{x}(n)$ 은 n 번째 스냅샷 벡터이고, 추정된 공간 상관 행렬에 대한 역행렬을 이용하여 스냅샷 단위로 반복적으로 구하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\mathbf{R}}_x^{-1}(n) = \lambda^{-1}\hat{\mathbf{R}}_x^{-1}(n-1) - \lambda^{-1} + \mathbf{k}(n)\mathbf{x}^H(n)\hat{\mathbf{R}}_x^{-1}(n-1) \quad (14)$$

식 (14)에서 $\mathbf{k}(n)$ 은 Kalman 이득 벡터이며, λ 는 망각 인자이다. 또한 이와 더불어 Kalman 필터 기법을 응용한 Extended QR-RLS 방법을 이용하여 공간 상호 상관 행렬을 반복적으로 구할 수 있으며 식(15)는 이에 대한 관계식을 나타낸다.[3]

$$\begin{bmatrix} \lambda^{1/2}\hat{\mathbf{R}}_x^{-1/2}(n-1) & \mathbf{x}(n) \\ \lambda^{1/2}\mathbf{P}^H(n-1) & d_{k,l}(n) \\ \mathbf{0}^T & 1 \\ \lambda^{1/2}\hat{\mathbf{R}}_x^{-H/2}(n-1) & 0 \end{bmatrix} \Theta(n) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{R}}_x^{-1/2}(n) & 0 \\ \mathbf{P}^H(n) & \xi(n)\gamma^{1/2}(n) \\ \mathbf{x}^H(n)\hat{\mathbf{R}}_x^{-H/2}(n) & \gamma^{1/2}(n) \\ \hat{\mathbf{R}}_x^{-H/2}(n) & -\mathbf{k}(n)\gamma^{-1/2}(n) \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (15)에서 $\xi(n)$ 은 기준신호 $n-1$ 번째 스냅샷 벡터로부터 계산된 빔형성기의 가중벡터와 n 번째 스냅샷 입력 벡터를 이용하여 추정된 기준신호와와의 오차신호를 나타내며, 이를 전오차신호 (priori error)라고 한다. $\gamma(n)$ 은 전오차신호와 후오차신호, 즉 기준신호와 n 번째 스냅샷 벡터로부터 계산된 빔형성기의 가중벡터와 n 번째 스냅샷 입력벡터를 이용하여 추정된 기준신호와와의 오차신호 $e(n)$ 간의 비를 나타낸다. 또한 $\Theta(n)$ 는 단단계 Given's Rotation을 수행한 후 최종적으로 나타나는 unitary 특성을 갖는 변환행렬이다. 이후 Systolic 어레이 구조로 매 스냅샷 마다 갱신되는 식 (15)상의 값들을 사용하여, QR-RLS 빔형성 안테나 가중 벡터들을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\underline{\mathbf{w}}_{k,l}(n) = \underline{\mathbf{w}}_{k,l}(n-1) + (\mathbf{k}(n)\gamma^{-1/2}(n))(\xi(n)\gamma^{1/2}(n))^* \quad (16)$$

V. 모의실험 및 고찰

본 모의실험에서는 3GPP에서 제안된 W-CDMA의 Up-link의 송신단 구조를 이용하였으며 사용자를 구별하는 long Scrambling code를 사용하였다. 무선 다중 경로 페이딩 채널을 모의실험 하기 위해서 복소 페이딩 계수 감쇠 이득 값은 Rayleigh 분포를 갖고 위상 값은 균일한 분포를 갖도록 정하였다. 각각의 수신된 신호들과 관련된 다중 경로 시간 지연들과 완벽한 채널추정에 의해 모든 사용자에게 대응하는 다중경로 신호의 입사각은 완벽히 안다고 가정하였다. 모든 사용자에게 대한 송신 전력은 '1'로 고정된 후 3가지의 다중경로 신호와 COST231-Hata 경로손실 모델을 적용하여 각각의 서로 다른 수신전력을 적용하였다[4]. 배열 안테나에 입사되는 각도는 -60° 에서 60° 의 범위로 균일하게 확산되어 있다고 가정하였다.

그림 2는 일반적인 MVDR 빔형성기법의 효과를 나타내기 위하여 사용자 3명의 다중경로 성분을 고려하지 않는 경우이며, 이때 원하는 사용자 경로는 입사각 5° , 간섭경로 입사각은 각각 -34° 와 42° 일 경우 굵은 실선의 빔패턴은 MVDR 기법을 적용한 경우로 최상의 가중치 벡터에 의해 원하는 사용자 경로 방향으로의 출력을 최대화 시키고 간섭경로와 잡음 성분이 포함된 원하지 않는 사용자 신호 성분들에 대해서는 출력 전력을 최소화한 경우이다. 가는 실선은 방향벡터의 공액복소 값들을 안테나 가중치로 삼는 빔형성기를 이용한 방법 (Complex Conjugate Directional vector; CCDV)의 빔패턴이다.

그림 3은 매 샘플마다 페이딩 값이 변하는 fast 페이딩 채널 환경에서 셀 내의 다중접속간섭을 고려하여 사

용자 수 증가에 따른 원하는 사용자에 대한 BER 곡선으로 이때 각 사용자에 대한 다중경로수는 3개로 지정하였다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 셀 내에서 사용자의 수를 증가 시키는 경우 CCDV 성능보다 MVDR 알고리즘을 적용한 공간필터를 사용한 경우가 더 나은 성능을 보임을 알 수 있다. 이 때 E_b/N_0 는 0dB로 가정하였다.

그림 4는 다중경로를 고려하여 셀 내에 사용자 수 및 E_b/N_0 를 증가시키면서 원하는 사용자에 대한 BER을 나타낸 것으로 E_b/N_0 가 12dB 이상일 경우 MVDR 기법을 적용한 Systolic 어레이의 공간필터 구조가 CCDV 기법보다 최소 4dB이상의 성능을 개선시킴을 보인다.

그림 5는 파일럿 심볼을 사용하지 않는 MVDR 기법과 파일럿 심볼을 사용하는 RLS 방법을 함께 적용한 경우로써 MVDR 기법과 비교한 것이다.

VI. 결론

본 논문에서는 W-CDMA 무선통신 환경에서 각 샘플마다 배열 안테나로 입력되는 스펙트럼 벡터를 다중경로 페이딩 채널 상황에서 MVDR 기법을 적용한 Systolic 어레이 구조를 갖는 병렬처리 구조의 공간필터를 제안하고 이에 대한 성능을 비교 분석하였다. 그 결과 지지국에서 배열 안테나를 사용하고, 공간 영역에서 신호의 간섭들을 억압하기 위한 MVDR 기반의 공간적인 필터를 적용함으로써, 일반적인 방향벡터에 대한 공액복소값을 빔형성 가중치로 사용한 경우보다 우수한 성능을 가짐을 확인하였으며, 결과적으로 용량을 증가시키는 효과적인 방법임을 확인하였다. 또한 병렬처리 구조를 갖는 Systolic 어레이 형태의 공간필터를 적용함으로써, 최적의 가중치 벡터를 처리하는데 있어서 고속화가 가능하고 ASIC화가 용이하다는 장점을 갖게 될 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, Smart antennas for wireless communications : IS-95 and third generation CDMA applications, Prentice Hall, 1999.
- [2] A.F. Naguib, A. Paulraj, T. Kailath, "Capacity improvement with base station antenna arrays in cellular CDMA", Vehicular Technology, IEEE Transactions on , Volume: 43. Aug. 1994.
- [3] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, 4th ed. 2001
- [4] Lalitha Sankaranarayanan, "Wireless Communication Technologies", Lecture 01-26-00, Course No. 16:332:559, 2000.

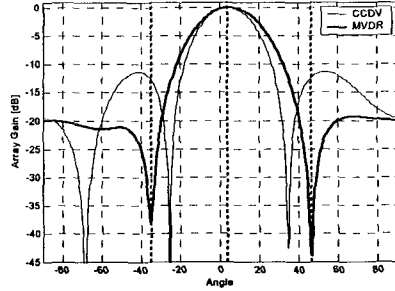


그림 2. MVDR 기반의 빔형성기의 빔패턴 특징

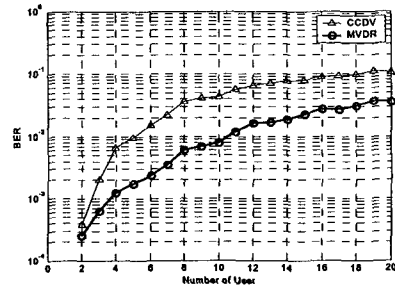


그림 3. MVDR 기반의 Systolic 어레이 구조를 이용한 경우의 BER

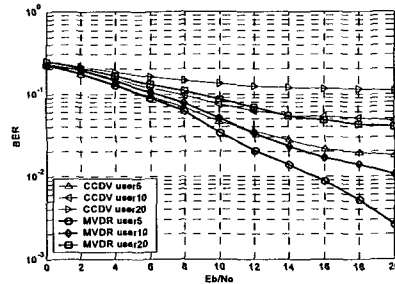


그림 4. MVDR과 CCDV 기법 적용시 사용자 수 및 E_b/N_0 증가에 대한 BER.

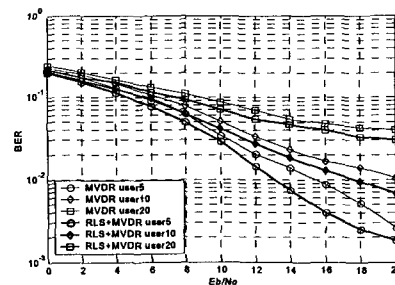


그림 5. MVDR과 RLS+MVDR기법 적용시 E_b/N_0 증가에 대한 BER