

논문 2004-41TC-11-1

# 하향링크 다중 안테나 MC-CDMA 시스템을 위한 다단계 병렬 널링 및 병렬 부분 간섭 제거 수신기 설계

(Multistage Parallel Nulling-Partial PIC Receiver for Downlink MIMO MC-CDMA Systems)

구 정 회\*, 김 경 연\*, 심 세 준\*, 이 총 용\*\*

(Jeong-Hoe Ku, Kyeongyeon Kim, Sejoon Shim, and Chungyong Lee)

## 요 약

본 논문에서는 다중 안테나를 사용한 다중 반송파 대역확산 다중접속 (MIMO MC-CDMA) 시스템을 위한 다단계 병렬 널링 및 병렬 부분 간섭 제거 수신기 (MPN-PPIC)를 제안한다. 기존의 V-BLAST 수신기는 널리 알려져 있는 다중 안테나 시스템에 대한 수신 방법으로, 단일 사용자 하향 링크 다중 안테나 MC-CDMA 시스템에 대해서는 어느 정도 좋은 성능을 보이지만, 다중 사용자의 경우에 있어서는 심각한 성능 저하 (error floor)를 보이는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서 제안한 수신기는 다중 사용자 환경에서 이러한 성능 저하를 보이지 않으며, 다단계 연산을 통해서 보다 더 나은 성능을 얻을 수 있다. 또한, 제안한 방법은 chip interleaving을 하는 경우, 다단계 연산을 통해 단일 사용자 환경에 대해서도 V-BLAST보다 더 나은 성능을 보인다. 제안한 방법에 대한 이와 같은 성능은 컴퓨터 모의 실험을 통해서 확인해 본다.

## Abstract

We propose multistage parallel nulling (MPN) partial parallel interference cancellation (PPIC) receiver for downlink multiple-input multiple-output (MIMO) multicarrier (MC)-code division multiple access (CDMA) systems. Though the V-BLAST is a popular MIMO receiver, it shows error floor for multiuser downlink MIMO MC-CDMA systems. The proposed MPN-PPIC receiver does not produce error floor for multiuser case, and achieves substantial performance gains with multistage processing. For single user case, the proposed method also surpasses the V-BLAST receiver with multistage processing for MIMO MC-CDMA systems with chip level interleaving. The system performance of the proposed MPN-PPIC receiver is evaluated through computer simulations.

**Keywords:** 4세대 이동 통신, 다중 안테나 전송, 다중 반송파 대역 확산 다중 접속, 병렬 간섭제거기

## I. 서 론

차세대 무선 통신 시스템 연구에 있어서 가장 주된 목표 중의 하나는 고속의 데이터 전송과 보다 효율적인 시스템 운용이 가능한 통신 시스템의 개발이다. 최근 들어, 다중 안테나를 사용한 다중 반송파 대역확산 다중접속 (MIMO MC-CDMA) 시스템에 대한 연구가 많

은 관심을 끌고 있는데, 이 시스템은 다중 안테나 전송 (MIMO), 직교 주파수 분할 다중 (OFDM) 방식, 대역확산 다중접속 (CDMA) 방식을 결합한 통신 시스템이다.

이 시스템은 각각의 요소 시스템들이 갖고 있는 장점을 최적으로 결합함으로써, 높은 주파수 사용 효율과 시스템 용량을 갖게 된다. 또한 다중 페이딩 환경에서 다중 경로에 의한 간섭을 효과적으로 제거해주면서 고속의 데이터 전송이 가능하며, 다중 접속에 있어서 보다 융통성 있게 시스템을 운용할 수 있는 특징을 갖는다. 이러한 여러 가지 시스템의 특성을 바탕으로, 이 시스템은 현재 4세대 (4G) 무선 통신 시스템의 유력한 후보 중에 하나로 대두하고 있다<sup>[1][2]</sup>.

\* 학생회원, \*\* 정회원, 연세대학교 전기전자공학과  
(Dept. of Electrical and Electronic Engineering  
Yonsei University)

※ 본 논문은 삼성전자 지원으로 이루어진 연세 4G 프로젝트의 일환으로 수행되었습니다.

접수일자: 2004년7월21일, 수정완료일: 2004년9월13일

다중 안테나 (MIMO) 전송에 있어서 가장 잘 알려진 수신 방법으로는 V-BLAST (Vertical Bell Lab layered Space Time) 방법이 있는데, 이는 순차 간섭 제거 (Successive Interference Cancellation : SIC) 방법에 기반하고 있다<sup>[3],[4]</sup>. 다중 안테나 MC-CDMA 시스템의 하향 링크에 있어서도, 수신단에서 송신 안테나간의 간섭을 제거하기 위한 방법으로 V-BLAST 방법이 사용되고 있는데, 단일 사용자 환경에서는 어느 정도 좋은 수신 성능을 얻을 수 있지만 다중 사용자 환경에서는 성능이 매우 열악한 것으로 알려져 있다<sup>[6],[8]</sup>. 본 논문에서는 하향링크 다중 안테나 MC-CDMA 시스템 환경에서 기존의 V-BLAST 수신 방법이 갖게 되는 문제점을 살펴보고, 이를 개선하기 위한 새로운 수신 방법을 제안한다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 하향 다중 송수신 안테나를 사용한 다중 반송파 대역 확산 다중접속 시스템 및 신호모델을 살펴보고, III장에서는 이 시스템에 대한 V-BLAST 방법의 문제점에 대해서 살펴본다. IV장에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 논문에서 제안하는 방법에 대해서 설명하고, V장에서 실험 결과를 살펴본 후, VI장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

이 장에서는 MIMO MC-CDMA 시스템에 대한 모델과 이에 대한 신호 표현식에 대해서 살펴본다. 본 논문에서는 M개의 송신 안테나와 N개의 수신 안테나를 갖는 MIMO MC-CDMA 시스템을 가정하는데, 이에 대한 전체 시스템 블록도는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이, 다중 안테나 MC-CDMA 시스템에서는 송신단에서 입력 신호를 코드 길이가 SF인 확산 코드로 확산시킨 후, 각각의 칩 신호를 부반송파 (subcarrier)에 매핑시킨다<sup>[2]</sup>. 그리고, 이때 선택적으로 칩 단위의 interleaving을 할 수 있는데, 이 경우 주파수 다이버시티 효과를 더 얻을 수 있지만, 간섭 정도도 증가하게 된다. 모두  $N_c$ 개의 부 반송파에 매핑된 칩 신호들은 역 고속 퓨리에 변환 (IFFT)에 의해 시간 영역 신호로 바뀐 뒤에 보호구간 (Guard Interval : GI)을 붙여서 주파수 선택적인 폐이딩 채널을 통과한 후에 수신단에서 수신된다.

수신단에서는 각각의 수신 안테나별로 수신된 신호에 대해서 보호구간을 제거한 후에 이를 고속 퓨리에 변환 (FFT)을 통해 주파수 영역의 신호로 바꾸고  $N_c$  개 각각의

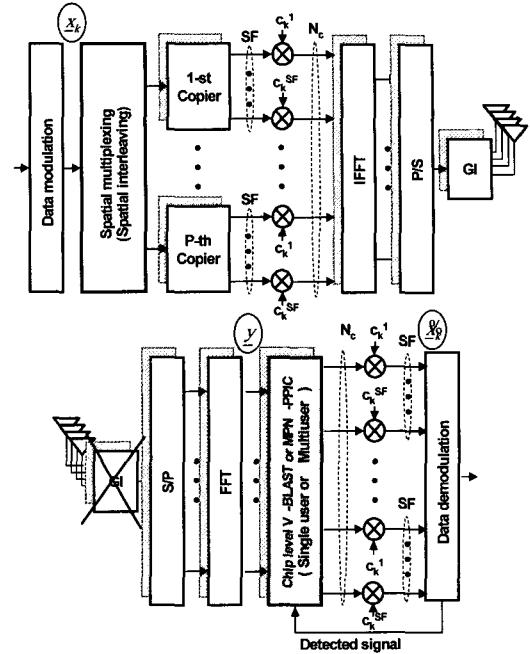


그림 1. 제안한 시스템의 전체 블록도  
Fig. 1. The proposed system block diagram.

부반송파에 대해서 V-BLAST의 널링 과정을 해 주고, 각각의 부반송파에 매핑되어 전송된 SF개의 칩 신호 단위로 역확산 및 양자화 과정을 거쳐서 송신 신호를 검출해 내게 된다. 이제 수신단에서 고속 퓨리에 변환 (FFT)을 거친 후에 얻어지는 주파수 영역에서의  $j$  번째 부반송파에 대한 수신 신호 모델을 살펴보면 아래 식 (1), (2)와 같다.

$$\begin{aligned} y^j &= H^j \cdot x^j + n^j \quad , \text{ where } 0 \leq j \leq N_c - 1 \\ y^j &= [y_1^j \ y_2^j \ \dots \ y_N^j]^T \\ x^j &= [x_1^j \ x_2^j \ \dots \ x_M^j]^T \\ n^j &= [n_1^j \ n_2^j \ \dots \ n_N^j]^T \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H^j &= \begin{bmatrix} h_{1,1}^j & h_{1,2}^j & \dots & h_{1,M}^j \\ h_{2,1}^j & h_{2,2}^j & \dots & h_{2,M}^j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1}^j & h_{N,2}^j & \dots & h_{N,M}^j \end{bmatrix} \\ &= [h_1^j \ h_2^j \ \dots \ h_M^j] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_i^j &= \sum_{k=1}^{\tilde{K}} x_{i,k}^j + \sum_{k=\tilde{K}+1}^K x_{i,k}^j \\ x_{i,k}^j &= A_{i,k} \cdot b_{i,k}^{\text{floor}(j/SF)} \cdot c_k^{\text{mod}(j,SF)} \\ c_k &= [c_k^1 \ \dots \ c_k^{SF}]^T \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식 (1)에서  $x^j$ ,  $y^j$ 와  $n^j$ 는 각각  $j$ 번째 부반송파를 통해 전송되는 송수신 신호 및 가우시안 부가잡음이고,  $H^j$ 와  $h_m^j = [h_{1,m}^j \ h_{2,m}^j \ \dots \ h_{1,m}^j]^T$ 는 각각  $j$ 번째 부반송파에 대한 채널 행렬 및 송신 안테나  $m$ 에 대한

채널 벡터이며, 이 때  $h_{n,m}^j$ 는 m번째 송신 안테나로부터 n번째 수신 안테나로의 채널 계수를 나타낸다. 식 (2)에서  $\text{floor}(x)$ 와  $\text{mod}(x, y)$ 는 각각 x보다 크지 않은 최대 정수와  $x/y$ 에 대한 모듈로 연산자로, 이를 통해 각 칩 신호를 부반송파에 할당해 준다.

일반적으로 하향 링크 통신에서 모두  $K$ 개의 확산 코드를 사용한다고 했을 때, 한 사용자에게  $K$ 개의 코드를 모두 할당하는 경우와 여러 명의 사용자에게 각각  $K$ 개의 코드 중에서 일부를 나눠서 할당하는 경우가 있다. 본 논문에서는 전자의 경우를 단일 사용자 환경이라 하고, 후자의 경우를 다중 사용자 환경이라고 한다. 또한, 설명의 편의를 위해 다중 사용자의 경우, 본 논문에서는 두 명의 사용자가 있는 환경에 대해서만 살펴보고, 이 경우 첫 번째 사용자에게  $\tilde{K}$ 개의 확산 코드를 할당하고 두 번째 사용자에게  $K - \tilde{K}$ 개의 코드를 할당한다고 가정한다.

### III. V-BLAST 수신기

다중 안테나 시스템의 수신단에서는 안테나간의 간섭을 제거해 주기 위해서 각 송신 안테나에 대해서 순차적으로 널링 (nulling) 과정과 제거 (cancelling) 과정을 적용하는 V-BLAST 방법을 사용하는데, 이는 ordered successive interference cancellation (SIC)를 기반으로 한다<sup>[5]</sup>. 식 (1)에서 보는 바와 같이, 수신단에서 FFT를 한 후에 얻게 되는 주파수 영역에서의 각 부반송파에 대한 신호는 단일 반송파에 대한 신호와 같음을 알 수 있다. 따라서, 다중 안테나 MC-CDMA 시스템의 수신단에서는 각각의 부반송파에 대해서 V-BLAST를 수행해 준다. 앞으로 특별히 혼동이 되는 경우를 제외하고는 표기의 편의를 위해서 부반송파 인덱스  $j$ 는 생략한다. 앞의 수신 신호식 (2)를 이용하여 다중 안테나 MC-CDMA에 대한  $i$ 번째 송신 안테나에 대한 널링과 제거 과정을 간단히 표현하면 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} z_i^j &= w_i^T \cdot y \quad , \text{where } 1 \leq i \leq M \\ \tilde{x}_{i,k} &= MF_k(z_i^1, \dots, z_i^{SF}) \\ y^j &= y^j - h_i^j \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \tilde{x}_{i,k}^j, \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $w_i = [w_{i1} \dots w_{iM}]^T$ 는  $i$ 번째 송신 안테나에 대한 널링 벡터이고,  $MF_k(x)$ 는 신호  $x$ 의  $k$ 번째 확산

코드에 대한 정합 필터링 (matched filtering) 및 양자화 과정을 나타낸다.

식 (3)에서 보는 바와 같이 다중 사용자 환경에서 첫 번째 사용자에게  $\tilde{K}$ 개의 코드가 할당된 경우, 첫 번째 사용자 신호에 대한 제거 과정에서는 첫 번째 사용자에게 할당된  $\tilde{K}$ 개의 코드만을 이용하여 얻은 신호를 제거하게 되므로, 첫 번째 사용자가 알지 못하는 나머지  $K - \tilde{K}$  코드에 의한 신호는 간섭으로 작용하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 이러한 간섭 신호들이 계속되는 널링과 제거 과정에서 V-BLAST 수신기의 성능 저하의 원인이 된다.

### IV. 제안하는 방법

먼저, 다중 안테나 MC-CDMA 시스템의 다중 사용자 하향 링크에서 기존의 V-BLAST 방법에 대한 성능 저하의 원인을 식 (2), (3)의 신호모델을 이용하여 살펴본다. 그리고, 앞으로 설명의 편의를 위해 송신 안테나의 순서대로 널링 과정과 제거 과정을 수행한다고 가정한다.

이제, 안테나 1에 대한 널링 과정과 제거 과정을 살펴보면 각각 식 (4), (5)와 같다. 여기서,  $\alpha_{1j}$ 는 널링 벡터  $w_1$ 과 채널 벡터  $h_j$  ( $j \neq 1$ ) 간의 내적 값으로, 안테나 1 이외의 다른 송신 안테나로부터의 간섭 신호를 없애 준다.

$$\begin{aligned} z_1 &= \underline{w}_1^T \cdot \underline{y} \\ &= \alpha_{11} \cdot x_1 + \alpha_{12} \cdot x_2 + \dots + \alpha_{1M} \cdot x_M + n' \\ &= \underbrace{\alpha_{11} \cdot \left( \sum_{k=1}^{\tilde{K}} x_{1,k} + \sum_{k=\tilde{K}+1}^K x_{1,k} \right)}_{D+I_1} + n' \\ &\quad + \underbrace{\alpha_{12} \cdot \left( \sum_{k=1}^{\tilde{K}} x_{2,k} + \sum_{k=\tilde{K}+1}^K x_{2,k} \right) + \dots + \alpha_{1M} \cdot \left( \sum_{k=1}^{\tilde{K}} x_{M,k} + \sum_{k=\tilde{K}+1}^K x_{M,k} \right)}_{I_2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y' &= y - \underline{h}_1 \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \tilde{x}_{1,k} \\ &= \underline{h}_1 \cdot \left( \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \epsilon_{1,k} + \sum_{k=\tilde{K}+1}^K x_{1,k} \right) + h_2 \cdot x_2 \\ &\quad + \dots + \underline{h}_M \cdot x_M + n \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서  $\epsilon_{1,k}$ 는 안테나 1의 송신신호와 검출신호 사이의 오차신호로  $x_{1,k} - \tilde{x}_{1,k}$ 와 같다. 이러한 오차신호는 다음 안테나에 대한 널링 과정에 간섭 신호로 전파되어 수신 성능 저하의 원인이 되는데, 이는 아래에서 자세히 살펴본다. 안테나 1에 대한 제거 과정에 이어서, 안

테나 2에 대한 새로운 널링 벡터를 구해서, 널링 과정을 수행하게 되는데, 이를 살펴보면 아래의 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} z_2 &= \underline{w}_2^T \cdot \underline{y}' \\ &= \underline{w}_2^T \cdot \left( \underline{h}_1 \cdot \left( \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \underline{\varepsilon}_{1,k} + \sum_{k=\tilde{K}+1}^K \underline{x}_{1,k} \right) + \underline{h}_2 \cdot \underline{x}_2 + \dots + \underline{h}_M \cdot \underline{x}_M + \underline{n} \right) \\ &= \underbrace{\alpha'_{22} \cdot \left( \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \underline{x}_{2,k} + \sum_{k=\tilde{K}+1}^K \underline{x}_{2,k} \right)}_{D+I_1} + \underbrace{\alpha'_{21} \cdot \left( \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \underline{\varepsilon}_{1,k} + \sum_{k=\tilde{K}+1}^K \underline{x}_{1,k} \right)}_{E_s} \\ &\quad + \underbrace{\alpha'_{23} \cdot \sum_{k=1}^K \underline{x}_{3,k} + \dots + \alpha'_{2M} \cdot \sum_{k=1}^K \underline{x}_{M,k} + n'}_{I_2} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서  $I_2$ 는 다른 송신 안테나로 부터의 간섭의 합으로 널링 과정에 의해서 제거되는 신호이다.

여기서, 안테나 2에 대한 널링 벡터  $\underline{w}'_2$ 는 안테나 신호 1에 대한 제거과정을 한 후에 채널 행렬  $H$ 에서 송신 안테나 1에 대한 채널벡터  $\underline{h}_1$ 을 제거하고 남는 채널 행렬에 대해서 새로 구한 널링 벡터이다. 따라서,  $\underline{w}'_2$ 는 채널 벡터  $\underline{h}_1$ 을 충분히 널링 시킨다고 볼 수 없으므로, 결국 이 두 벡터의 내적값인  $\alpha'_{21}$ 은 무시할 수 없을 정도의 큰 값을 갖게 된다. 본 논문에서는 이를 널링벡터와 채널 벡터간의 불일치에 의한 오차 값으로 정의한다.

다중 안테나 하향링크 MC-CDMA 시스템의 경우, 식 (6)에서 보는 바와 같이  $E_s$ 에는 안테나 1에서 전파된 오차 신호 성분 즉, 신호 검출에 따른 오차  $\epsilon_{1,k}$ 와 다른 사용자의 코드에 의한 간섭 성분  $x_{i,k}$  ( $\tilde{K}+1 \leq k \leq K$ )이 누적되어  $\alpha'_{21}$ 과 곱해져 있다. 따라서, 이러한 오차 성분에 의한 간섭은 안테나 2에 대한 신호 검출에 있어서 무시할 수 없는 간섭신호로 작용하게 된다.

더욱이, 나머지 송신 안테나에 대해서 순차적으로 널링과정과 제거과정을 수행함에 따라, 앞서 살펴본 바와 같은 이유로  $E_s$ 에는 점점 더 많은 오차 신호들이 전파되어서, 널링벡터와 채널벡터의 불일치에 의해 생기는 큰 내적값과 곱해져서 누적되게 된다. 따라서, 앞서 살펴본 바와 같이 다중 사용자 환경에서 하향링크 MIMO MC-CDMA 시스템에 대한 V-BLAST 수신기의 성능 저하의 가장 큰 원인은 이러한 오차 성분  $E_s$ 에 의한 간섭에 따른 것으로 생각할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 식 (6)에서와 같은 오차 성분  $E_s$ 의 누적에 따른 영향을 효과적으로 없애줄 수 있는 새로운 수신 알고리즘으로, 모든 송신 안테나에 대해서

병렬적으로 널링을 수행하고, 각각의 안테나 성분에 대해서 다단계 병렬 부분 간섭 제거기를 적용한 수신기 (multistage parallel nulling partial parallel interference cancellation : MPN-PPIC)를 제안한다.

제안하는 수신기의 구조를 설명하면 다음과 같다. 먼저 수신 신호에 대해서 각각의 송신 안테나에 대한 널링 벡터를 이용해서 병렬적으로 널링을 수행한다. 설명의 편의를 위해서 송신 안테나 1에 대해서만 설명을 하지만, 나머지 안테나에 대해서도 똑같은 방식으로 적용할 수 있다. 안테나 1에 대한 널링 과정은 식 (4)와 같다. 널링된 신호에 대해서 식 (7)의 과정을 거쳐서 안테나 1의 신호 중에서 첫 번째 사용자에게 할당된  $\tilde{K}$ 개의 확산 코드들로 역확산 및 양자화 과정을 거쳐 전송된 신호를 검출해낸다.

$$\begin{aligned} z_i^j &= \underline{w}_i^T \cdot \underline{y}^j \\ \tilde{x}_{1,k}^{(0)} &= MF_k(z_i^1, \dots, z_i^{SF}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 윗첨자 <sup>(0)</sup>는 널링 과정과 역확산 및 양자화 과정만을 통해서 검출해낸 신호임을 나타낸다. 즉, 널링과 정합필터 (matched Filter) 만을 이용하여 얻은 신호이다. 다른 모든 송신 안테나에 대해서도 같은 방식으로 각각의 송신 안테나로부터 전송된 신호에 대한 정합 필터로 검출된 신호  $\tilde{x}_{i,k}^{(0)}$  ( $1 \leq i \leq M, 1 \leq k \leq K$ )를 구한다. 이제, 이 신호들을 이용하여 다음의 식 (8)과 같이 다단계 병렬 부분 간섭 제거를 수행하게 된다.

식 (8)에서  $\beta$ 는 간섭 신호 성분에 대해서 어느 정도나 제거해 줄지를 결정하는 가중치로, 일반적으로 이 값은 0에서 1 사이의 값을 갖는데, 이 값을 최적으로 설정해 줌으로써 병렬 간섭 제거기의 성능을 크게 향상 시킬 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$\begin{aligned} z_1^{(1)} &= \underline{w}_1^T \cdot \left[ \underline{y} - \beta \cdot \left( \underline{h}_2 \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \tilde{x}_{2,k}^{(0)} + \underline{h}_3 \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \tilde{x}_{3,k}^{(0)} + \dots + \underline{h}_M \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \tilde{x}_{M,k}^{(0)} \right) \right] \\ &= z_1 - \beta \cdot \left( \alpha_{12} \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \tilde{x}_{2,k}^{(0)} + \alpha_{13} \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \tilde{x}_{3,k}^{(0)} + \dots + \alpha_{1M} \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \tilde{x}_{M,k}^{(0)} \right) \\ &= \underbrace{\alpha_{11} \cdot \left( \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \underline{x}_{1,k} + \sum_{k=\tilde{K}+1}^K \underline{x}_{1,k} \right)}_{D+I_1} + \underbrace{\alpha_{12} \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \underline{\varepsilon}_{2,k}^{(0)} + \dots + \alpha_{1M} \cdot \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \underline{\varepsilon}_{M,k}^{(0)}}_{E_p} \\ &\quad + \underbrace{\left( \alpha_{12} \cdot \sum_{k=\tilde{K}+1}^K \underline{x}_{2,k} + \dots + \alpha_{1M} \cdot \sum_{k=\tilde{K}+1}^K \underline{x}_{M,k} \right) + n'}_{I_s} \end{aligned} \quad (8)$$

제안한 방법에서는 식 (8)에서 보는 바와 같이, 오차 성분  $E_p$ 에는 다른 안테나로부터의 간섭 신호에 의한 오차가 널링 벡터와 각각의 해당 안테나에 대한 채널 벡

터 간의 내적값과 곱해져 있다. 하지만, 이 과정에서 사용되는 각각의 널링 벡터들은 모든 채널 벡터들을 고려했기 때문에 앞서 V-BLAST의 경우에서 정의한 널링 벡터와 채널 벡터간의 불일치에 의한 오차 값이 존재하지 않는다. 따라서, 다른 안테나로부터의 간섭 신호에 의한 오차를 줄여줄 수 있으면, 이러한 오차 성분에 의한 간섭 영향을 없애줄 수 있게 된다.

이를 위해, 식 (8)에서 살펴본 바와 같이 다단계에 걸쳐 이전 단계에서 구한 다른 송신 안테나로부터의 간섭 신호에 적절히 가중치를 곱해서 제거해 나감으로써, 각각의 송신 안테나로부터의 신호 검출의 오차를 점점 줄일 수 있고, 이렇게 좀 더 정확하게 구해진 신호 성분은 다음 단계의 PPIC 과정에서 간섭 신호에 의한 오차를 줄여주게 된다. 따라서, 전체적으로 오차 성분  $E_p$ 에 의한 영향을 점점 더 줄여 나갈 수 있고, 이를 통해 전체적인 수신 성능을 개선시킬 수 있다.

MIMO MC-CDMA 시스템에서 chip interleaving을 하게 되며, 주파수 다이버시티를 얻을 수 있지만, 역화산 시에 간섭 또한 커지게 된다. 이러한 trade-off 관계 측면에서, 기존의 V-BLAST와 제안한 방법의 성능을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, frequency diversity가 증가하게 되면, ordered SIC에 기반한 V-BLAST의 경우 ordering에 의한 잇점을 얻을 수 없는 반면, PIC에 기반한 MPN-PPIC 방법이 더 많은 잇점을 얻을 수 있게 된다. 또한, 제안한 방법의 경우 앞서 설명한 바와 같이 역화산 시의 간섭도 효과적으로 제거해 줄 수 있다.

계산량 측면에서 V-BLAST와 본 논문에서 제안한 MN-PPIC 방법을 비교해 보면 다음과 같다. 먼저, V-BLAST 방법의 경우 각각의 송신 안테나마다 널링 벡터를 구해주기 위한 채널 행렬에 대한 역변환 연산과 널링 순서를 정해주기 위한 과정과 ordering이 필요한데 반해, 제안한 방법은 다단계 연산을 위해서는 추가적인 연산이 필요하지만, 한번만 널링 벡터를 구해주면 된다. 일반적으로 행렬의 역변환 연산이 전체 연산량 중에서 가장 큰 부분을 차지하므로, 이를 정량적으로 비교해 보면, V-BLAST의 경우 역변환 연산에  $O(M^3)$  차수의 연산이 필요하고, 이를  $M$ 개의 송신 안테나에 대해서 매번 수행해 주어야 하므로,  $M = N$ 인 경우에 전체적인 계산량의 차수는  $O(M^4)$ 가 된다. 하지만, 제안하는 방법의 경우엔 역변환 연산을 한번만 수행해 주면 되고, 다단계 연산의 횟수를 2회로 제한하는 경우, 전체적인 계산량의 차수는  $O(M^3)$ 가 된다.

[9],[10]. 따라서, 제안한 방법은 적은 전력 소모를 요구하는 단말기에 적용하기에도 V-BLAST에 비해 이점을 갖는다.

## V. 실험 결과

본 논문에서 제안한 방법의 성능을 기존의 V-BLAST 수신기와 비교하여 검증해 보기 위해서, 컴퓨터 모의 실험을 단일 사용자 환경과 다중 사용자 환경으로 나누어서 비교해 보았다.

컴퓨터 모의 실험에서는 표 1. 에서와 같은 변수값을 사용했고, chip interleaving을 적용했다. 그리고, 제안한 방법에서 사용되는 간섭제거 가중치의 최적값은 모의 실험을 통해서 0.4를 얻어서 이를 사용했다.

먼저 단일 사용자 환경의 경우, 한 사용자가 확산 코드 28개를 사용하는 경우에 대해서 V-BLAST와 본 논문에서 제안한 MPN-PPIC 방법에 대한 결과를 살펴보면 그림 2와 같다. 제안한 방법에 대해서 병렬 널링만 했을 때는 기존의 V-BLAST의 경우보다 성능 저하를 보였지만, 다단계 병렬 부분 제거 방법을 추가적으로 적용했을 경우엔 V-BLAST보다 BER 성능  $10^{-2}$ 에 대해서 5 dB 정도의 이득을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

그리고, 다중 사용자의 경우, 두 명의 사용자에게 각각 14개씩의 코드가 할당 되었을 경우에 대한 성능은 그림 3과 같다. 기존의 V-BLAST 수신기의 경우에는 높은  $E_b/N_0$ 에 대해서도 심각한 성능 저하(error floor)를 겪게 되지만, 제안한 방법의 경우에 있어서는 이러한 성능 저하를 보이지 않는다.

또한, MPN-PPIC에 대해서, 첫번째 단계를 적용하였을 경우에 병렬적으로 널링만을 적용했을 때 보다, BER 성능  $10^{-2}$ 에 대해서 5 dB 정도의 추가이득을 얻을 수 있고, 두 번째 단계를 적용했을 경우엔 0.2 dB의 이

표 1. 컴퓨터 모의 실험에 사용한 변수  
Table 1. Parameters for computer simulation.

변수	값
송,수신 안테나 수 (M,N)	4
확산 코드	Walsh Code
확산 코드의 길이 (SF)	32
부반송파의 수 (Nc)	1024
보호구간의 길이 (GI)	64
다중 경로의 수 (L)	24
변조 방식	QPSK
단말의 속도	180 km/h
간섭 제거 가중치 ( $\beta$ )	0.4

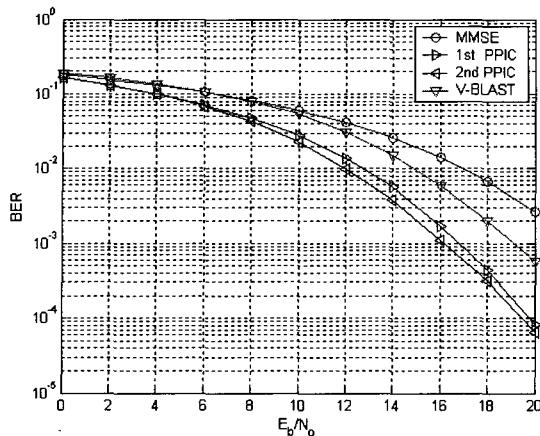


그림 2. 단일 사용자에 대한 BER 성능

Fig. 2. BER performance for single user.

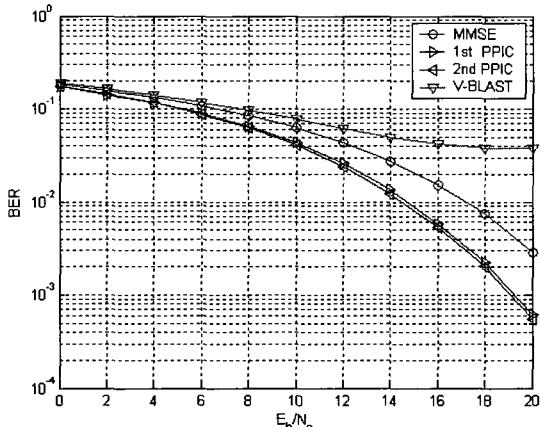


그림 3. 다중 사용자에 대한 BER 성능

Fig. 3. BER performance for multiuser.

득을 얻을 수 있다. 실험 결과, 이러한 다단계 간섭 제거 과정에 의한 이득은 두 단계 이상에 대해서는 성능 개선 효과가 크지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 다단계 연산에 의해서 각 단계에서 검출된 신호에 대한 추정값이 점점 정확해짐에 따라 다음 단계에서 추가적으로 얻을 수 있는 이득이 줄어들기 때문이다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 하향 링크 MIMO MC-CDMA 시스템의 수신방법으로 기존의 V-BLAST 방법이 갖고 있는 문제점을 분석해 보고, 이러한 문제점을 해결할 수 있는 새로운 수신기로 다단계 병렬 널링 및 병렬 부분 간섭 제거 수신기 (MPN-PPIC)를 제안했다. 컴퓨터 모의 실험 결과, 제안한 방법은 단일 사용자 환경과 다중 사용자 환경 모두에 있어서, 기존의 V-BLAST 수신기에

서 발생했던 순차 간섭 제거 방식에 따른 여러 성분의 누적에 의한 성능 저하 문제를 효과적으로 해결함으로써 다중 사용자 환경에서는 기존의 V-BLAST 방법이 갖고 있던 오차 바닥 (error floor)을 보이지 않고, 더욱이 다단계 연산을 통해 추가적인 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] R. van Nee, G. Awater, M. Morikura, H. Takanashi, M. Webster, and K.W. Halford, "New high-rate wireless LAN standards," IEEE Comm -un. Mag., pp. 82-88, Dec. 1999.
- [2] S. Hara and R. Prasad, "Overview of multicarrier CDMA," IEEE Comm. Mag., pp.126-133, Dec. 1997.
- [3] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", Wireless Perso -nal Communications, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [4] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden and R.A. Valenzuela, "VBLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich scattering wireless channel", ISSSE'98, pp. 295-300, 1998.
- [5] H. Zhu, Z. Lei, and F. Chin, "Performance comparison of multiple-transmit multiple-receive V-BLAST algorithms", IFIP PWC'02, pp. 11-18, Oct. 2002.
- [6] Zhongding Lei, Xiaoming Peng, and Francois P. S. Chin, "V-BLAST Receivers for Downlink MC-CDMA Systems," IEEE 58th VTC 2003 -Fall, pp. 866-870, Oct. 2003.
- [7] D. Divsalar, M. K. Simon, and D. Raphaeil, "Improved parallel interference cancellation for CDMA," IEEE Trans. Commun., vol. 46, pp. 258-268, Feb. 1998.
- [8] Kyeongyeon Kim, Jaesang Ham, and Chungyong Lee, "Performance Analysis of a Downlink MIMO MC-CDMA System with Turbo Coding and Cannel Interleaving," IEEE 59th VTC 2004-Fall, to be published.
- [9] R. Michael Buehrer, Neiyer S. Correal-Mendoza, Brian D. Woerner, "A Simulation Comparison of Multiuser Receivers for Cellular CDMA," IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. 49, pp. 1065-1085, July 2000.
- [10] Wei Zha, Steven D. Blostein, "Modified Decorrelating Decision-Feedback Detection of BLAST

Space-Tmie System," IEEE ICC 2002, vol. 1, pp. 335-339, 28 April-2 May 2002.

---

### 저 자 소 개

---



**구 정 회(학생회원)**  
 1993년 연세대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 1995년 포항공대 전자전기공학과  
 석사 졸업.  
 2004년 현재 연세대학교 전기전자  
 공학과 박사 과정.

<주관심분야: 통신신호처리, MIMO 시스템>



**김 경 연(학생회원)**  
 2001년 연세대학교 전기전자  
 공학과 학사 졸업.  
 2003년 연세대학교 전기전자  
 공학과 석사 졸업.  
 2004년 현재 연세대학교 전기  
 전자공학과 박사 과정.

<주관심분야: 통신신호처리, MIMO 시스템>



**심 세 준(학생회원)**  
 1999년 연세대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 2001년 연세대학교 전기전자  
 공학과 석사 졸업.  
 2004년 현재 연세대학교 전기  
 전자공학과 박사 과정.

<주관심분야: 통신신호처리, MIMO 시스템>



**이 총 용(정회원)**  
 1995년 Georgia Institute of  
 Technology 박사 졸업.  
 1996년~1997년 삼성 전자 연구원  
 2004년 현재 연세대학교 전기전자  
 공학과 부교수

<주관심분야: 통신신호처리, 어레  
 이 신호처리, MIMO 시스템>

