

논문 2011-48TC-8-2

# 8 안테나 인터리브 시스템을 위한 준직교 시공간 블록 부호 TBH의 부분 간섭 제거 그룹 복호 알고리즘

(8 Antenna Interleaved Quasi Orthogonal Space Time Block Code TBH  
with PIC Group Decoding)

이 문 호\*, 이 미 성\*\*, Mohammad Abu Hanif\*\*, 박 주 용\*\*\*

(Moon Ho Lee, Mi Sung Lee, Mohammad Abu Hanif, and Ju Yong Park)

## 요 약

본 논문에서는 선형 분산 시공간 블록 부호(STBC)의 부분간섭 제거(PIC) 그룹 복호와 인터리브 준직교 시공간 블록 부호인 TBH와 Jafakhani의 8x8 행렬을 위한 부분 간섭 제거 그룹 복호를 제안한다. 수신기에서 사용하여 최대 다이버시티를 달성할 수 있는 부분간섭제거 그룹 복호는 시공간 블록 부호(STBC)에 포함된 심벌을 몇몇의 그룹으로 나누고, 선형 부분 간섭 제거가 이루어진 후에 개별적으로 각 그룹에 대한 복호를 진행한다. 이는 단일 그룹에 포함된 모든 심벌을 한꺼번에 복호하는 최대 우도(ML) 복호와 제로포싱(ZF) 후에 독립적인 하나의 심벌을 갖는 각 그룹에 대해 개별적으로 복호를 하는 제로포싱(ZF) 복호의 중간형태로 볼 수 있다. 부분 간섭 그룹 복호는 그룹의 심벌의 수를 선택함으로써 복잡도와 성능 간의 타협점(tradeoff)을 조절할 수 있는 프레임워크(framework)를 제공한다. 본 논문에서 제안한 부분 간섭 제거 그룹 복호를 통하여 복잡도를 상당히 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

## Abstract

In this paper we studied a conventional system and propose a new decoding scheme for Space-time Frequency Code with Interleaved System. We also addressed the quasi orthogonal function with Jacket matrices in modern 3GPP LTE uplinked advance system. We also introduce the Partial Interference Cancellation (PIC) group decoding which provides a framework to adjust the complexity-performance tradeoff by choosing the sizes of the information symbols groups.

**Keywords :** 부분 간섭 제거(PIC), 그룹 복호(group decoding), 준직교 시공간블록부호(QOSTBC) TBH, 최대 우도(ML) 복호, 제로 포싱(ZF) 복호

## I. 서 론

본 논문에서는 부분 간섭 제거(PIC:partial

interference cancellation) 그룹 복호 알고리즘을 인터리브 준직교 시공간 블록 부호(QO-STBC:quasi-orthogonal-space time block coding)인 TBH에 적용하여 이에 따른 복호 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통해서 확인하였다. 부분 간섭 제거 그룹 복호는 시공간 블록 부호(STBC)에 포함된 심벌을 몇몇의 그룹으로 나누고, 선형 부분 간섭 제거가 이루어진 후에 개별적으로 채널의 직교성을 이용하여 각 그룹에 대한 복호를 진행한다. 이는 단일 그룹에 포함된 모든 심벌을 한꺼번에 복호하는 최대 우도(ML:maximum likelyhood) 복호와 제

\* 평생회원-교신저자, \*\* 학생회원, 전북대학교 전자공학부 (Chonbuk National University)

\*\*\* 정회원, 신경대학교 인터넷정보통신학과 (Shingyeong University)

※ 본 연구는 세계수준의 연구 중심 대학 (WCU) R32-2009-20014-0과 기초연구 2010-0020942 NRF (한국연구재단) 지원으로 이루어졌음.

접수일자: 2011년5월12일, 수정완료일: 2011년8월17일

로포싱(ZF:zero forcing) 후에 독립적인 하나의 심벌을 갖는 각 그룹에 대해 개별적으로 복호를 하는 제로포싱 복호의 중간형태로 볼 수 있다. 부분 간섭 제거 그룹 복호는 홀수 번째 위치하는 채널과 짝수 번째 위치하는 채널의 직교성을 이용하여 복호하는 알고리즘이다. 점근적으로 최적인 부분 간섭 제거 그룹에 대한 설계 기준을 점근적인 최적(Asymptotic Optimal) 그룹 복호 알고리즘에 확대 적용할 수 있다. 최대 우도 검출 방식은 모든 전송 가능한 심벌 벡터에 대한 메트릭(metric)을 계산하여 이것이 최소가 되는 전송 벡터를 추정하는 방식으로, 모든 전송 가능한 심벌 벡터의 전송확률이 동일할 때, 최대 성능을 얻을 수 있고, 전송 안테나의 수와 변조 차수가 증가함에 따라 최대 우도 검출을 수행하는데 요구되는 계산량은  $\hat{X} = \operatorname{argmin} |y - Hx|^2$ 에서 알 수 있듯이, 기하급수적으로 증가한다. 이러한 이유로, 실제적으로 하드웨어로 구현하는데 있어서 많은 어려움이 있지만, 이론적으로 최적 성능을 달성하기에, 다른 신호 검출 기법의 타당성을 판단하기 위한 대조군으로 많이 이용된다. 반면에, 부분 간섭 제거는 서로 다른 위치에 존재하는 채널의 직교 특성을 이용하여 이를 그룹화하여  $\hat{X} = \operatorname{argmin} P_0 y - \sqrt{SNR} P_0 g_0 x_0$ 와 같이 복호한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 서론에서는 부분 간섭 제거 그룹 복호 알고리즘에 대하여 간단하게 살펴 보았고, II장에서는 Alamouti 2x2 STBC 부분 간섭 제거 복호에 대하여 살펴 보았으며, III장에서는 준직교 시공간 블록 부호 TBH를 4개의 안테나를 갖는 시스템에 적용하였고, IV장에서는 4개 및 8개의 안테나를 갖는 좌표 인터리브 시공간 부호를 설계하였으며, V장에서는 컴퓨터 모의실험을 통하여 이의 타당성을 확인하였을 뿐만 아니라 추후 연구를 위한 결론을 맺었다.

## II. Alamouti 2x2 STBC 부분 간섭 제거 복호

먼저, 수신기에서 Alamouti code로 부호화된 수신 신호에 대해 채널 결합 기법을 통하여 채널을 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 \\ -x_1^* & x_0^* \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

그리고 채널 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = [g_1, g_2] \quad (2-2)$$

여기서,

$$g_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix}, \quad g_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix}$$

Projection 채널 직교화를 위한 투영(project) 행렬은,

$$Q_k = G_k^c \left( (G_k^c)^H G_k^c \right)^{-1} (G_k^c)^H \quad (2-3)*$$

\*부록에서 증명

여기서  $G_k^c$ 는 행렬의 열벡터에 대한 완전 계수로 간주한다. 만약  $G_k^c$ 가 이를 만족하지 않는다면,  $P_k$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_k = I_0 - Q_k = I_0 - \left\{ G_k^c \left( (G_k^c)^H G_k^c \right)^{-1} (G_k^c)^H \right\} \quad (2-4)$$

Alamouti 기법의 그룹화된 채널 행렬을 식 (2-4)에 대입하면 Projection 행렬을 구할 수 있다. 식 (2-4)에서  $G_k^c$ 의  $I_k$ 는 그룹을 의미하고  $c$ 는 cancellation을 의미한다. Alamouti 기법을 사용한 2-antenna 시스템을 위한 그룹  $I_k$ 는  $\{(I_1), (I_2)\}$ 로 나타낼 수 있다. 이를 이용하여 Projection 행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{I_1} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix} \left( \frac{1}{2} [h_2^* - h_1] \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix} \right)^{-1} \frac{1}{\sqrt{2}} [h_2^* - h_1] \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix} \frac{2}{|h_1|^2 + |h_2|^2} [h_2^* - h_1] \\ &= \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_2|^2 & -h_1 h_2 \\ -h_1^* h_2^* & |h_1|^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} P_{I_1} &= I_0 - \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_2|^2 & -h_1 h_2 \\ -h_1^* h_2^* & |h_1|^2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_1|^2 & h_1 h_2 \\ h_1^* h_2^* & |h_2|^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-6)$$

같은 방법으로 두 번째 그룹의 Projection 행렬을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{I_2} = \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_2|^2 & -h_1 h_2 \\ -h_1^* h_2^* & |h_1|^2 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

### 2.1 Projection 행렬의 특성

위에서 구한 Projection 행렬  $P_{I_1}$  과  $P_{I_2}$ , 그리고 Alamouti 기법으로 부호화된 그룹 채널 행렬  $G_{I_1}$  과  $G_{I_2}$  와의 간단한 연산을 통해 복호화 과정에서 이용할 다음의 유용한 특성을 얻을 수 있다. 즉,  $P_1 + P_2 = I_2$  이다.

$$P_1 + P_2 = \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 \\ 0 & |h_1|^2 + |h_2|^2 \end{bmatrix} = I_2 \quad (2-8)$$

Projection 행렬과 그룹 채널 행렬 사이의 관계를 보여주는데 자기 자신 이외의 연산을 모두 0으로 만족시키는 성질을 아래에서 확인할 수 있다.

$$P_1 g_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_1|^2 h_2 - |h_1|^2 h_2 \\ |h_2|^2 h_1^* - |h_2|^2 h_1^* \end{bmatrix} = 0, \\ P_1 g_1 = g_1 \quad (2-9)$$

$$P_2 g_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_1|^2 h_2 - |h_2|^2 h_1 \\ -|h_1|^2 h_2^* + |h_1|^2 h_2^* \end{bmatrix} = 0, \\ P_2 g_2 = g_2 \quad (2-10)$$

### 2.2 Projection 행렬을 이용한 복호

앞 절에서 구한 특성과 복호화 과정인 식(2-8)을 이용해 전송 신호를 검출해 보면 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &= \arg \min_{s_1 \in \mathbb{A}} \| P_1 r - \sqrt{SNR} P_1 g_1 s_1 \|^2 \\ &= \arg \min_{s_1 \in \mathbb{A}} \left\| \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_1|^2 h_1 h_2 \\ |h_1^* h_2^* |h_2|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} - \sqrt{SNR} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} |h_1| \\ |h_2^*| \end{bmatrix} s_1 \right\|^2 \\ &= \arg \min_{s_1 \in \mathbb{A}} \left\| \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_1| \\ |h_2^*| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |h_1| h_2 \\ |h_1^* h_2^*| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} - \sqrt{\frac{SNR}{2}} \begin{bmatrix} |h_1| \\ |h_2^*| \end{bmatrix} s_1 \right\|^2 \\ &= \arg \min_{s_1 \in \mathbb{A}} \left\| \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_1| \\ |h_2^*| \end{bmatrix} \left\{ (|h_1^* r_1 + h_2 r_2) - \sqrt{\frac{SNR}{2}} (|h_1|^2 + |h_2|^2) s_1 \right\} \right\|^2 \\ &= \arg \min_{s_1 \in \mathbb{A}} \left| h_1^* r_1 + h_2 r_2 - \sqrt{\frac{SNR}{2}} (|h_1|^2 + |h_2|^2) s_1 \right| \end{aligned} \quad (2-11)$$

같은 방법으로 또 다른 신호  $\hat{s}_2$ 를 구할 수 있다.

$$\hat{s}_2 = \arg \min_{s_2 \in \mathbb{A}} \left| h_2^* r_1 - h_1 r_2 - \sqrt{\frac{SNR}{2}} (|h_1|^2 + |h_2|^2) s_2 \right| \quad (2-12)$$

Alamouti 시공간 부호에 대한 최대 우도 복호 성능과 부분 간섭 제거 그룹 복호 성능은 그림 2와 같다. 복

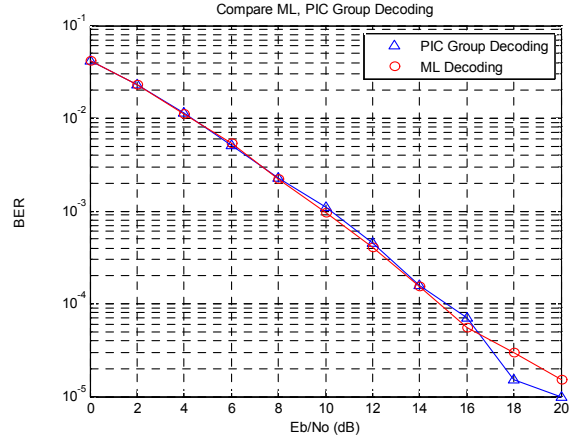


그림 2. Alamouti 2x2 STBC PIC 그룹복호기법과 ML기법의 성능 비교

Fig. 2. Performance comparison between PIC group decoding and ML decoding of Alamouti 2x2 STBC.

호 성능 면에서는 별 차이가 없지만 부분 간섭 제거 그룹 복호를 통하여 복호의 복잡도를 상당히 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

## III. TBH 기법을 사용하는 4-Antenna 시스템

### 3.1 채널 그룹방법에 따른 특성

우선 4-Antenna 시스템을 사용하는 TBH 기법에서의 채널 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = [g_1, g_2, g_3, g_4] \quad (3-1)$$

여기서,

$$g_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \\ h_3 \\ h_4^* \end{bmatrix}, g_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \\ h_4 \\ -h_3^* \end{bmatrix}, g_3 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_3 \\ h_4^* \\ h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix}, g_4 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_4 \\ -h_3^* \\ h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix}$$

위에서 구한 채널 행렬을 두 그룹  $\{(I_1), (I_2)\}$ 으로 나눌 수 있다. 먼저,  $\{(g_1, g_2), (g_3, g_4)\}$ 으로 나눈다면, 앞에서 언급했던 식 (2-5), (2-7)을 이용하여, Alamouti 기법에서 Projection 행렬을 구했던 방법과 같은 방법으로, 이에 해당하는 Projection 행렬을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$Q_k = G_k^c \left( (G_k^c)^H G_k^c \right)^{-1} (G_k^c)^H \\ P_k = I_0 - Q_k = I_0 - \left\{ G_k^c \left( (G_k^c)^H G_k^c \right)^{-1} (G_k^c)^H \right\}$$

$$\begin{aligned}
Q_{1,2} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_3 & h_4 \\ h_4^* - h_3^* \\ h_1 & h_2 \\ h_2^* - h_1^* \end{bmatrix} \left( \frac{1}{4} \begin{bmatrix} h_3^* & h_4 & h_1^* & h_2 \\ h_4^* - h_3^* & h_2^* - h_1^* \\ h_1 & h_2 \\ h_2^* - h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_3 & h_4 \\ h_4^* - h_3^* \\ h_1 & h_2 \\ h_2^* - h_1^* \end{bmatrix} \right)^{-1} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_3^* & h_4 & h_1^* & h_2 \\ h_4^* - h_3^* & h_2^* - h_1^* \\ h_1 & h_2 \\ h_2^* - h_1^* \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_3 & h_4 \\ h_4^* - h_3^* \\ h_1 & h_2 \\ h_2^* - h_1^* \end{bmatrix} \\
&\left( \frac{1}{4} \begin{bmatrix} |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2 & 0 \\ 0 & |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_3^* & h_4 & h_1^* & h_2 \\ h_4^* - h_3^* & h_2^* - h_1^* \\ h_1 & h_2 \\ h_2^* - h_1^* \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2} \\
&\begin{bmatrix} |h_3|^2 + |h_4|^2 & 0 & h_1^* h_3 + h_2^* h_4 & h_2 h_3 - h_1 h_4 \\ 0 & |h_3|^2 + |h_4|^2 & h_1^* h_4 - h_2^* h_3 & h_2 h_4^* + h_1 h_3^* \\ h_1 h_3^* + h_2 h_4^* & h_1 h_4 - h_2 h_3 & |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 \\ h_2^* h_3 - h_1^* h_4 & h_2^* h_4 + h_1^* h_3 & 0 & |h_1|^2 + |h_2|^2 \end{bmatrix} \\
&\quad (3-2)
\end{aligned}$$

위의 Projection 행렬에서 역행렬(inverse matrix)이 대각행렬(diagonal matrix)이기 때문에 연산량이 반으로 줄어든다. 이를 이용하여 Projection 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
P_{1,2} &= \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2} \\
&\begin{bmatrix} |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 & -h_1^* h_3 - h_2^* h_4 & h_1 h_4 - h_2 h_3 \\ 0 & |h_1|^2 + |h_2|^2 & h_2^* h_3 - h_1^* h_4 & -h_2 h_4^* - h_1 h_3^* \\ -h_1 h_3^* - h_2 h_4^* & h_2 h_3 - h_1 h_4 & |h_3|^2 + |h_4|^2 & 0 \\ h_1^* h_4 - h_2^* h_3 & -h_2^* h_4 - h_1^* h_3 & 0 & |h_3|^2 + |h_4|^2 \end{bmatrix} \\
&\quad (3-3)
\end{aligned}$$

위의 Projection 행렬과 다른 그룹과의 연산은 식 (3-4)과 같이 모두 0이 된다. 이는 복호과정에서 복호에 필요하지 않은 모든 간섭(interference)을 제거할 수 있는 중요한 특성이다.

$$P_{1,2} G_{3,4} = 0 \quad (3-4)$$

그러나 Projection 행렬과 같은 그룹과의 연산에서 자신 그대로가 나와야하는 성질을 만족하지 않는다. 이러한 특성으로 인해 앞에서 언급한 방법을 그룹 복

호화 과정에서 사용할 수 없다. 마찬가지로,  $\{(g_1, g_4), (g_2, g_3)\}$ 으로 나누는 경우에도 식 (3-4)만을 만족하기 때문에 그룹 복호화 과정에서 사용할 수 없다.

그룹 복호화 과정의 전제 조건인, 앞에서 언급한 두 가지 주요 특성을 만족하려면, 나누어지는 그룹들이 각각 직교(orthogonal)해야 한다. 다음 절에서는 그룹들끼리 직교하는 경우를 검토한다.

### 3.2 직교성을 가진 채널 그룹방법

식 (3-1), (3-2)에서 나누어진 채널이 직교하도록 다음과 같이 그룹화 한다.

$$\{(I_1), (I_2)\} = \{(g_1, g_3), (g_2, g_4)\} \quad (3-5)$$

$$G_{I_1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_1 & h_3 \\ h_2^* & h_4^* \\ h_3 & h_1 \\ h_4^* & h_2^* \end{bmatrix}, \quad G_{I_2} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_2 & h_4 \\ -h_1^* & -h_3^* \\ h_4 & h_2 \\ -h_3^* & -h_1^* \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$(g_1, g_3) \perp (g_2, g_4)$ 에서 알 수 있듯이 각 그룹은 서로 직교한다. 하지만 각 그룹을 이루는 채널은 직교하지 않는다. 이와 같은 이유로, Projection 행렬을 구하는 과정이 복잡해진다.

$$\begin{aligned}
Q_{2,4} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_1 & h_3 \\ h_2^* & h_4^* \\ h_3 & h_1 \\ h_4^* & h_2^* \end{bmatrix} \left( \frac{1}{4} \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 & h_3^* & h_4 \\ h_3^* & h_4 & h_1^* & h_2 \\ h_1 & h_2 \\ h_2^* - h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 & h_3 \\ h_2^* & h_4^* \\ h_3 & h_1 \\ h_4^* & h_2^* \end{bmatrix} \right)^{-1} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 & h_3^* & h_4 \\ h_3^* & h_4 & h_1^* & h_2 \end{bmatrix} \\
&\quad (3-7)
\end{aligned}$$

$$P_{2,4} = I_0 - Q_{2,4} \quad (3-8)$$

식 (3-7), (3-8)를 이용하여 다음과 같이 전송 신호를 복호할 수 있다.

$$\hat{s}_{I_k} = \arg \min_{s_{I_k} \in \mathbb{A}^2} \| P_{I_k} r - \sqrt{SNR} P_{I_k} G_{I_k} \overline{s_{I_k}} \| \quad (3-9)$$

위 식에서 우 항의 ‘-’ 뒤 항  $P_{I_k} G_{I_k}$ 는 식 (2-15), (2-16)의 특성에 의해 구하고자 하는 그룹  $G_{I_k}$ 만 남게 되고, ‘-’ 앞 항  $P_{I_k} r$  역시 식 (2-15), (2-16)의 특성에 의해 수신기에 수신된 신호  $r$  중에서 구하고자 하는 그룹의 신호를 제외한 나머지 그룹의 신호를 모두 0으로 만들어 복호가 가능하게 한다.

### IV. 8 안테나 좌표 인터리브 준 직교 시공간 블록 부호 TBH의 설계

시공간 Alamouti 직교 부호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 \\ -x_1^* & x_0^* \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

4개의 전송 안테나를 사용하는 인터리브 직교 구조를 나타내면 식 (4-2)와 같다.

$$A_{CI} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_0 & \tilde{x}_1 & 0 & 0 \\ -\tilde{x}_1^* & \tilde{x}_0^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{x}_2 & \tilde{x}_3 \\ 0 & 0 & -\tilde{x}_3^* & \tilde{x}_2^* \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

출력 행렬은 다음과 같다.

$$H^H y = \begin{bmatrix} |h_0|^2 + |h_1|^2 & & & 0 \\ & |h_0|^2 + |h_1|^2 & & \\ & & |h_2|^2 + |h_3|^2 & \\ 0 & & & |h_2|^2 + |h_3|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_0 \\ \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{bmatrix} + \tilde{N} \quad (4-3)$$

4개의 심벌 집합  $\{x_0, x_1, x_2, x_3\}$ 은 최대 다이버시티를 얻을 수 있다. 이의 좌표 인터리브는 다음과 같다.<sup>[2]</sup>

$$x_i = \tilde{x}_{i,I} + i\tilde{x}_{(i+2) \bmod 4,Q} \quad (4-4)$$

$$\tilde{x}_i = x_{i,I} + i\tilde{x}_{(i+2) \bmod 4,Q} \quad (4-5)$$

여기서,  $\tilde{x}_{i,I}$ 는 2개 안테나 다이버시티를 얻을 수 있으며,  $\tilde{x}_{(i+2) \bmod 4,Q}$ 는 또 다른 2개 안테나 다이버시티를 얻을 수 있다. 따라서 이러한 기법에 근거하여 모두 4개 안테나 다이버시티를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_0 &= x_{0I} + jx_{2Q}, & \tilde{x}_2 &= jx_{0Q} + x_{2I}, \\ \tilde{x}_4 &= x_{4I} + jx_{6Q}, & \tilde{x}_6 &= jx_{4Q} + x_{6I}, \\ \tilde{x}_1 &= x_{1I} + jx_{3Q}, & \tilde{x}_3 &= jx_{1Q} + x_{3I}, \\ \tilde{x}_5 &= x_{5I} + jx_{7Q}, & \tilde{x}_7 &= jx_{5Q} + x_{7I} \end{aligned} \quad (4-6)$$

여기서, 식 (4-6)과 (4-7)은 요소의 실수부와 허수부를 나타낸다. 예를 들어, 고속 푸리에 변환(FFT) 연산

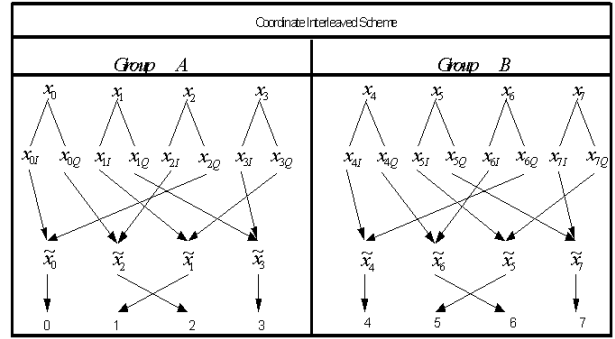


그림 1. 좌표 인터리브 기법의 매핑  
Fig. 1. Mapping of Coordinate Interleaving Scheme.

과 같이, 원래의 심벌 집합으로부터 좌표 인터리브 심벌  $x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ 은 그림 1과 같다.

TBH 행렬은 다음과 같다.

$$A_{CI8} = \begin{bmatrix} A_{CI} & B_{CI} \\ B_{CI} & A_{CI} \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

이때 인터리브 행렬은 아래와 같다.

$$A_{CI8} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_0 & \tilde{x}_1 & 0 & 0 & \tilde{x}_4 & \tilde{x}_5 & 0 & 0 \\ -\tilde{x}_1^* & \tilde{x}_0^* & 0 & 0 & -\tilde{x}_5^* & \tilde{x}_4^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{x}_2 & \tilde{x}_3 & 0 & 0 & \tilde{x}_6 & \tilde{x}_7 \\ 0 & 0 & -\tilde{x}_3^* & \tilde{x}_2^* & 0 & 0 & -\tilde{x}_7^* & \tilde{x}_6^* \\ \tilde{x}_4 & \tilde{x}_5 & 0 & 0 & \tilde{x}_0 & \tilde{x}_1 & 0 & 0 \\ -\tilde{x}_5^* & \tilde{x}_4^* & 0 & 0 & -\tilde{x}_1^* & \tilde{x}_0^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{x}_6 & \tilde{x}_7 & 0 & 0 & \tilde{x}_2 & \tilde{x}_3 \\ 0 & 0 & -\tilde{x}_7^* & \tilde{x}_6^* & 0 & 0 & -\tilde{x}_3^* & \tilde{x}_2^* \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

따라서 식 (4-9)를 얻는다.

$$A_{CI8}^H A_{CI8} = \begin{bmatrix} a' & 0 & 0 & 0 & b' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a' & 0 & 0 & 0 & b' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c' & 0 & 0 & 0 & d' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c' & 0 & 0 & 0 & d' \\ b' & 0 & 0 & 0 & a' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b' & 0 & 0 & 0 & a' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d' & 0 & 0 & 0 & c' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d' & 0 & 0 & 0 & c' \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a' &= |\tilde{x}_0|^2 + |\tilde{x}_1|^2 + |\tilde{x}_4|^2 + |\tilde{x}_5|^2 \\ c' &= |\tilde{x}_2|^2 + |\tilde{x}_3|^2 + |\tilde{x}_6|^2 + |\tilde{x}_7|^2 \\ b' &= \tilde{x}_0\tilde{x}_4^* + \tilde{x}_4\tilde{x}_0^* + \tilde{x}_1\tilde{x}_5^* + \tilde{x}_5\tilde{x}_1^* \\ d' &= \tilde{x}_2\tilde{x}_6^* + \tilde{x}_6\tilde{x}_2^* + \tilde{x}_3\tilde{x}_7^* + \tilde{x}_7\tilde{x}_3^* \end{aligned} \quad (4-10)$$

$g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7$ 와  $g_8$ 은 동일한 채널 행렬의 다른 그룹이고 이 행렬은  $g_1, g_3, g_5, g_7$ 와  $g_2, g_4, g_6, g_8$ 가 서로 직교한다. 즉

$$(g_1 \perp g_3)(g_5 \perp g_7) \perp (g_2 \perp g_4)(g_6 \perp g_8)$$

이다.

$$y = Hx + n \quad (4-11)$$

$$\begin{bmatrix} h_1 & h_2 & 0 & 0 & h_5 & h_6 & 0 & 0 \\ h_2^* & -h_1^* & 0 & 0 & h_6^* & -h_5^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & h_4 & 0 & 0 & h_7 & h_8 \\ 0 & 0 & h_4^* & -h_3^* & 0 & 0 & h_8^* & -h_7^* \\ h_5 & h_6 & 0 & 0 & h_1 & h_2 & 0 & 0 \\ h_6^* & -h_5^* & 0 & 0 & h_2^* & -h_1^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_7 & h_8 & 0 & 0 & h_3 & h_4 \\ 0 & 0 & h_8^* & -h_7^* & 0 & 0 & h_4^* & -h_3^* \end{bmatrix} \begin{matrix} \uparrow g_1 \\ \uparrow g_2 \\ \uparrow g_3 \\ g_4 \\ \uparrow g_5 \\ \uparrow g_6 \\ \uparrow g_7 \\ \uparrow g_8 \end{matrix}$$

Group 1                      Group 2

$$= [h_1 \dots h_8] \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 & 0 & 0 & \tilde{x}_5 & \tilde{x}_6 & 0 & 0 \\ -\tilde{x}_2^* & \tilde{x}_1^* & 0 & 0 & -\tilde{x}_6^* & \tilde{x}_5^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{x}_3 & \tilde{x}_4 & 0 & 0 & \tilde{x}_7 & \tilde{x}_8 \\ 0 & 0 & -\tilde{x}_4^* & \tilde{x}_3^* & 0 & 0 & -\tilde{x}_8^* & \tilde{x}_7^* \\ \tilde{x}_3 & \tilde{x}_6 & 0 & 0 & \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 & 0 & 0 \\ -\tilde{x}_6^* & \tilde{x}_5^* & 0 & 0 & -\tilde{x}_2^* & \tilde{x}_1^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{x}_7 & \tilde{x}_8 & 0 & 0 & \tilde{x}_3 & \tilde{x}_4 \\ 0 & 0 & -\tilde{x}_8^* & \tilde{x}_7^* & 0 & 0 & -\tilde{x}_4^* & \tilde{x}_3^* \end{bmatrix} + n$$

$$(4-12)$$

따라서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{r}_1 \\ \tilde{r}_2^* \\ \tilde{r}_3 \\ \tilde{r}_4^* \\ \tilde{r}_5 \\ \tilde{r}_6^* \\ \tilde{r}_7 \\ \tilde{r}_8^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & 0 & 0 & h_5 & h_6 & 0 & 0 \\ h_2^* & -h_1^* & 0 & 0 & h_6^* & -h_5^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & h_4 & 0 & 0 & h_7 & h_8 \\ 0 & 0 & h_4^* & -h_3^* & 0 & 0 & h_8^* & -h_7^* \\ h_5 & h_6 & 0 & 0 & h_1 & h_2 & 0 & 0 \\ h_6^* & -h_5^* & 0 & 0 & h_2^* & -h_1^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_7 & h_8 & 0 & 0 & h_3 & h_4 \\ 0 & 0 & h_8^* & -h_7^* & 0 & 0 & h_4^* & -h_3^* \end{bmatrix} [x] + n$$

$$(4-13)$$

Xu, Xia [1]에 의해 제안된 부분 간섭 제거 (PIC) 복호에 따라서, 다음 식을 얻는다.

$$Q_0 = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \\ 0 \\ 0 \\ h_5 \\ h_6^* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \left[ \frac{1}{16} [h_1^* \ h_2 \ 0 \ 0 \ h_5^* \ h_6 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \\ 0 \\ 0 \\ h_5 \\ h_6^* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right]^{-1} \times \frac{1}{4} [h_1^* \ h_2 \ 0 \ 0 \ h_5^* \ h_6 \ 0 \ 0] \quad (4-14)$$

$$= \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_5|^2 + |h_6|^2} \begin{bmatrix} |h_1|^2 & h_1 h_2 & 0 & 0 & h_1 h_5^* & h_1 h_6 & 0 & 0 \\ h_1^* h_2^* & |h_2|^2 & 0 & 0 & h_2^* h_5^* & h_2^* h_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_5^* h_1^* & h_5^* h_2 & 0 & 0 & |h_5|^2 & h_5 h_6 & 0 & 0 \\ h_6^* h_1^* & h_6^* h_2 & 0 & 0 & h_6^* h_5^* & |h_6|^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

여기서,

$$P_0 g_0 = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ 0 \\ 0 \\ h_5 \\ h_6 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

그러므로 부분 간섭 제거의 복호 행렬은 아래와 같다.

$$\hat{d}_0 = \arg \min_{\tilde{x}_0 \in \mathcal{A}} \|P_0 y - \sqrt{SNR} P_0 g_0 \tilde{x}_0\| \quad (4-17)$$

$$= \arg \min_{\tilde{x}_0 \in \mathcal{A}} \left\| \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_5|^2 + |h_6|^2} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \\ 0 \\ 0 \\ h_5 \\ h_6^* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \right.$$

$$\left. \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{bmatrix} - \sqrt{\frac{SNR}{16}} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \\ 0 \\ 0 \\ h_5 \\ h_6^* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{x}_1 \right\|$$

다른 시간 슬롯 동안 목적지 노드가 수신한 신호를 나타낼 수 있다. 이는, 최적의 검출 신호가 주어졌던 것처럼 계산할 수 있다는 의미이다.

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_1 &= \arg \min_{\hat{x}_1 \in \mathcal{A}} \left\| \begin{pmatrix} (h_1^* y_1 + h_2 y_2 + h_3^* y_3 + h_4 y_4) \\ -\sqrt{\frac{SNR}{16}} (|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2) \hat{x}_1 \end{pmatrix} \right\| \\
 \hat{x}_2 &= \arg \min_{\hat{x}_2 \in \mathcal{A}} \left\| \begin{pmatrix} (h_2^* y_1 - h_1 y_2 + h_3^* y_3 - h_4 y_4) \\ -\sqrt{\frac{SNR}{16}} (|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2) \hat{x}_2 \end{pmatrix} \right\| \\
 \hat{x}_3 &= \arg \min_{\hat{x}_3 \in \mathcal{A}} \left\| \begin{pmatrix} (h_3^* y_3 + h_4 y_4 + h_5^* y_5 + h_6 y_6) \\ -\sqrt{\frac{SNR}{16}} (|h_3|^2 + |h_4|^2 + |h_5|^2 + |h_6|^2) \hat{x}_3 \end{pmatrix} \right\| \\
 \hat{x}_4 &= \arg \min_{\hat{x}_4 \in \mathcal{A}} \left\| \begin{pmatrix} (h_4^* y_3 - h_3 y_4 + h_5^* y_5 - h_6 y_6) \\ -\sqrt{\frac{SNR}{16}} (|h_3|^2 + |h_4|^2 + |h_5|^2 + |h_6|^2) \hat{x}_4 \end{pmatrix} \right\| \\
 \hat{x}_5 &= \arg \min_{\hat{x}_5 \in \mathcal{A}} \left\| \begin{pmatrix} (h_5^* y_1 + h_6 y_2 + h_7^* y_7 + h_8 y_8) \\ -\sqrt{\frac{SNR}{16}} (|h_5|^2 + |h_6|^2 + |h_7|^2 + |h_8|^2) \hat{x}_5 \end{pmatrix} \right\| \\
 \hat{x}_6 &= \arg \min_{\hat{x}_6 \in \mathcal{A}} \left\| \begin{pmatrix} (h_6^* y_1 - h_5 y_2 + h_7^* y_7 - h_8 y_8) \\ -\sqrt{\frac{SNR}{16}} (|h_5|^2 + |h_6|^2 + |h_7|^2 + |h_8|^2) \hat{x}_6 \end{pmatrix} \right\| \\
 \hat{x}_7 &= \arg \min_{\hat{x}_7 \in \mathcal{A}} \left\| \begin{pmatrix} (h_7^* y_3 + h_8 y_4 + h_9^* y_9 + h_{10} y_{10}) \\ -\sqrt{\frac{SNR}{16}} (|h_7|^2 + |h_8|^2 + |h_9|^2 + |h_{10}|^2) \hat{x}_7 \end{pmatrix} \right\| \\
 \hat{x}_8 &= \arg \min_{\hat{x}_8 \in \mathcal{A}} \left\| \begin{pmatrix} (h_8^* y_3 - h_7 y_4 + h_9^* y_9 - h_{10} y_{10}) \\ -\sqrt{\frac{SNR}{16}} (|h_7|^2 + |h_8|^2 + |h_9|^2 + |h_{10}|^2) \hat{x}_8 \end{pmatrix} \right\|
 \end{aligned} \tag{4-18}$$

표 1. 복잡성 비교  
Table 1. Complexity comparison.

	기준	제안
그룹	Alamouti 1	2
심볼/그룹	4	2
디코딩 복잡성	A	A/2

### V. 컴퓨터 모의실험 및 결론

컴퓨터 모의실험은 1000개의 심벌에 대해 수행하였다. 각 채널 모델의 100 채널 실험은 각 심벌의 전송으로 간주하였다. 컴퓨터 모의실험에서, SNR은 각  $R_X$  안테나에서 심벌(128개의 샘플로 구성되어 있는)에 있는 샘플 당 신호전력과 잡음 전력 비(dB)에 의해 정의된다. 노트에서 PIC 그룹 복호를 가정하였다.

각 그룹이 오직 한 개의  $n_i=1$ 를 포함할 때, 부분 간섭 제거 그룹 복호는 선형 제로포싱(ZF) 수신기에서 감소된다.  $N = 1, n_1 = n$  인 한 개의 그룹이 있을 때, 부분 간섭 제거 그룹 복호 ML 수신기이다. 그림 3은 부분 간섭 제거 복호의 성능이 기존의 기법의 성능과 거의 비슷하다는 것을 보여준다. 그러나 복호 복잡도를 상당히 줄일 수 있었다. 본 논문에서는 X. G. Xia 그룹에서 제안한 부분 간섭 제거 복호 알고리즘<sup>[1]</sup>을 인터리브 TBH에 적용하여 이의 타당성을 확인했다.

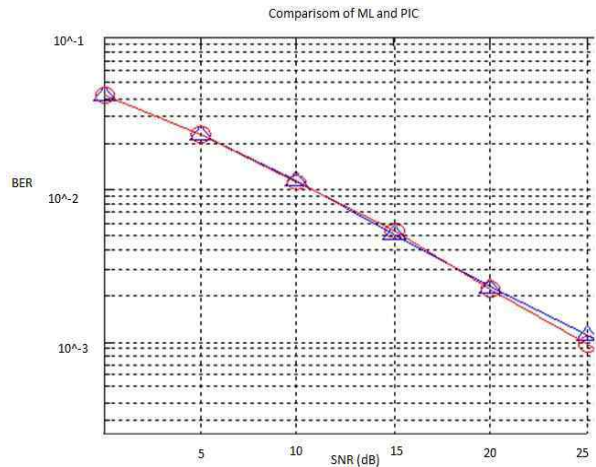


그림 3. TBH 8x8 STBC ML 복호 성능 PIC 복호 성능 비교

Fig. 3. Performance comparison between ML Decoding and PIC Decoding of TBH 8x8 STBC.

### 참고 문헌

- [1] Xiaoyong Guo and Xiang-Gen Xia, "On Full Diversity Space-Time Block Codes With Partial Interference Cancellation Group Decoding", IEEE Trans on Information Theory, vol. 55, no. 10, October 2009.
- [2] 이광재, 후가, 이문호, 조삼구, "8 안테나 인터리브 시스템 기반의 준직교 TBH 시공간 부호의 부분 간섭 제거 그룹 복호 디코딩", 한국전자과학회, vol. 16, no. 7, July 2005.
- [3] Morris L, Eaton, Multivariable statistics, John Wiley & Sons, 1983.

### \*부록 (2-3)식 증명

$2 \times 2$  wishat 부분 행렬은 다음과 같다.

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \tag{A-1}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 S_{21} &= S'_{12} \\
 S_{11.2} &= S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{21}
 \end{aligned}$$

그리고

$$S = X' X \tag{A-2}$$

만일

$$X = (X_1, X_2)$$

$$X_i : n \times p_i$$

분명히

$$S_{ij} = X_i' X_j \text{ for } i, j = 1, 2 \quad (\text{A-3})$$

$$S_{11,2} = X_1' X_1 - X_1' X_2 (X_2' X_2)^{-1} X_2' X_1 \text{ 여기서,} \quad (\text{A-4}) \\ = X_1' Q X_1$$

한편

$$Q = I_n - X_2 (X_2' X_2)^{-1} X_2' \quad (\text{A-5}) \\ = I_n - P_{I_k}$$

이므로 Q는  $X_2$ 에 대한 계수  $n - p_2$ 의 투영(projection)이다.

복잡한 경우에 투영도를 [ref]로 쓸 수 있다. 따라서 다음 식 (2-3)을 얻는다.

$$P_{I_k} = G_{I_k}^c ((G_{I_k}^c)^H G_{I_k}^c)^{-1} (G_{I_k}^c)^H \quad (\text{A-6})$$

Alamouti 2x2 시공간 블록 부호(STBC) 행렬

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix} \quad (\text{A-7})$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}$$

채널 행렬에 대해  $g_1$ 과  $g_2$ 는 다음과 같다.

$$g_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} \text{ and } g_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} h_2 \\ -h_1^* \end{bmatrix} \quad (\text{A-8})$$

따라서 다음 식을 얻는다.

$$P_{I_k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} \left( \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} \right)^H \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} \right)^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} \right)^H \\ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} \left( \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2^* \end{bmatrix} \\ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} h_1 h_1^* & h_1 h_2^* \\ h_1^* h_2 & h_2 h_2^* \end{bmatrix} \times \frac{2}{|h_1| + |h_2|^2} \\ = \frac{1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \begin{bmatrix} |h_1|^2 & h_1 h_2^* \\ h_1^* h_2 & |h_2|^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A-9})$$

### 저 자 소개

이 문 호(평생회원)

대한전자공학회 논문지

2010년 4월호 Vol.제48권 TC편 제 4호 참조

이 미 성(학생회원)

대한전자공학회 논문지

2010년 4월호 Vol.제48권 TC편 제 4호 참조



Mohammad Abu Hanif(학생회원)

2001년~2005년 방글라데시아시안 대학 졸업

2010년 3월 전북대학교

전자공학부 석사과정 재학

<주관심분야 : 이동통신 TH Precoding 설계>

박 주 용(정회원)

대한전자공학회 논문지

2010년 4월호 Vol.제48권 TC편 제 4호 참조