

다단계 반경-지향 알고리즘을 이용한 다중 사용자 신호 분리 시스템

정희원 이영조*, 윤석현**, 강성진***, 강창언**

The Novel Structure for Multi-User Separation using Multi-Stage Radius-Directed Algorithm

YoungJo Lee*, SukHyun Yoon**, SungJin Kang**, ChangEon Kang** *Regular Members*

요 약

여러 사용자가 통신을 하고 있을 경우, 수신된 신호는 서로 다른 채널을 통과한 사용자 신호들이 중첩되어 있다. 본 논문에서는 이들 다중 사용자 신호를 학습신호가 사용하지 않고 분리할 수 있는 등화기를 구성하고, 알고리즘으로 다단계 반경-지향 알고리즘을 사용하여 CMA와 성능을 비교한다. 직렬 연결 시스템은 한명의 사용자를 찾아주는 등화기와 찾은 신호의 성분을 수신기 입력 신호에서 빼주는 상관 제거기로 이루어진 구조를 직렬로 연결하여 모든 사용자를 찾아주는 시스템이다. 또한 직렬 연결 시스템을 이용하여 초기화된 병렬 연결 시스템을 사용하는 하이브리드 연결 시스템을 제안한다. 하이브리드 연결 시스템은 직렬 연결 시스템에서 발생할 수 있는 오류 전파 현상을 제거하면서 모든 사용자를 찾을 수 있다. 또한 다단계 반경-지향 알고리즘을 이용한 시스템이 CMA를 이용한 시스템 보다 우수함을 보인다.

ABSTRACT

The blind algorithms can be used to separate the multi-user signals, a superposition of signals from all the users and the additive noise. In this paper Equalizers having ability to separate those multi-user signals without the training sequence are proposed and multi-stage radius-directed algorithm is compared to CMA. A cascade system is constructed by serially connecting a number of stages, each of which is composed of equalizers that capture the one source signal and a correlation canceller that subtracts the captured source signal from the equalizer input. The output of the canceller is then processed in the next stage, which recovers another source signal in a similar manner. A hybrid system using a parallel structure initialized by the cascade system achieves no accumulation of misadjustment from stage to stage unlike the cascade system. Also Those systems using the multi-stage radius-directed algorithm obtain good convergence properties.

I. 서론

최근 무선 통신시스템은 통신 품질의 향상과 통신 용량을 증가시키기 위해서 여러개의 안테나를 사용하는 SDMA(Space Division Multiple Access)를 이용하고 있다. 다중 안테나를 이용하면 공간적 다이버시티를 통한 이득으로 원하는 신호레벨을 향상시킬 수

있다. 이런 환경하에서 안테나에 수신된 신호는 움직이는 여러명의 사용자로부터 다경로 채널을 통과한 신호들이 중첩된 것이다. 이러한 채널은 다중입력에 다중출력(MIMO)으로 모델링이 가능하다^{[1][2]}. 다중입력 다중출력 채널은 심볼간의 간섭뿐만 아니라 사용자 신호간의 간섭(co-channel interference 또는 adjacent-channel interference)이 존재한다. 그러므로 눈

* LG정보통신 중앙연구소(lj@lgic.co.kr) 정희원 ** 연세대학교 전자공학과 정희원 *** ETRI 정희원
논문번호 : 97284-0814, 접수일자 : 1997년 8월 14일

은 품질의 통신을 위해서는 사용자간의 신호들을 분리시킬 뿐만 아니라 간섭을 제거시켜주기 위한 등화기가 필요하며 블라인드 기법을 이용하면 효과적이다.

Falconer는 다중입력 다중출력의 채널 임펄스 응답을 알고 있다는 가정하에서 등화에 대해 연구하였다^[1]. 다중입력 다중출력 문제에 블라인드 알고리즘을 이용하여 채널을 예측하고 신호를 분리하는 알고리즘이 제안되기도 하였다^[4]. 하지만 다중입력 다중출력에 대한 직접적인 블라인드 등화 알고리즘을 이용한 것은 최근에 연구되기 시작하였다^{[5][6]}. Li와 Liu는 CMA의 비용함수에 다중 사용자들 간의 고차 상관을 빼주는 새로운 비용함수를 잡아주어 신호를 분리하면서 등화를 하는 알고리즘을 제안하였다^[7]. 그러나 이 알고리즘은 사용자가 증가하면 비용함수의 고차상관을 계산하는데 어려움이 발생한다. Papadias와 Paulraj는 등화기의 초기값을 다르게 주어 사용자를 분리하는 블라인드 알고리즘을 제안하였다. 그러나 이 논문에서도 지적하였지만, 초기값을 잡아주는 방법을 아직 찾지 못하여 사용할 수가 없다^[8]. Tugnait는 블라인드 등화기로 임의의 한 사용자를 찾아서 이 사용자와 입력 신호 사이의 상호 상관을 계산하여 제거시켜 주는 새로운 알고리즘을 제안하였다^[9].

본 논문에서는 시간적-공간적 다이버시티를 모두 이용하여 채널 상에서 생기는 심볼간의 간섭을 제거시켜 줄 뿐만 아니라 다중 사용자의 신호를 함께 분리시켜 주는 구조를 제안한다. 여러 안테나에서 수신된 신호를 이용하여 심볼간의 간섭과 사용자 간의 간섭을 완전히 제거한 한 명의 사용자를 찾은 후, 다음 사용자를 찾기 위해 앞에 찾은 사용자들의 신호가 제거된 새로운 등화기 입력신호를 만들어 준다. 계속하여 모든 사용자의 신호를 찾기 위해 위의 등화기와 같은 구조를 직렬로 연결한다. 또한 Papadias와 Paulraj가 제안한 병렬연결 방법의 문제인 초기값 계산을 위해서 하이브리드 구조를 제안한다. 하이브리드 연결 구조는 직렬연결 방식을 이용하여 초기값을 찾은 다음 그 초기값을 이용하여 병렬연결 구조를 사용하면 직렬연결에서 생기는 문제인 오류전파 현상을 없앨 수 있다. 또한 완벽한 수렴을 위해서 알고리즘은 다단계 알고리즘을 적용한다.

2장에서 다중입력 다중출력의 채널 모델링을 하고, 3장에서 임의의 한 사용자 신호를 찾기 위해서 다른

사용자 신호 간섭을 제거하는 시스템에 대해 알아본다. 4장에서는 모든 사용자 신호를 찾기 위한 직렬연결 구조와 하이브리드연결 구조 시스템에 대해 알아보고, 5장에서 실험을 통해 성능을 분석한다.

II. 다중입력 다중출력 채널 모델링

SDMA 환경에서 제안된 시스템의 성능을 예측하기 위해서 다중입력 다중출력 채널 모델이 필요하다. 이 절에서는 기존의 스칼라 모델을 다중 사용자 환경에 적합하게 벡터 채널 모델로 바꾸어 모델링한다.

1. 다중 사용자 환경

여러명의 사용자가 통신하고 있으며, 여러개의 안테나로 수신할 경우 각 사용자로부터 안테나에 수신되는 신호는 일반적으로 모두 다른 환경을 통하여 수신된다. 그러므로 d 명의 사용자가 있고, m 개의 안테나를 사용하여 심볼을 표본화할 경우 시스템 모델링은 시간 k 인 순간에 서로 상관이 없는 d 개의 복소 신호열 $a^{(1)}(k), \dots, a^{(d)}(k)$ 가 다음 식과 같은 서로 다른 임펄스 응답 $X^{(j)}$ 을 통과하여 안테나에 수신되는 것으로 표현되며, 이는 그림 1처럼 나타낼 수 있다. $X^{(j)}$ 는 j 번째 사용자의 신호가 i 번째 안테나에 도달하는 동안 통과하는 채널의 임펄스 응답으로 다음 식과 같이 모델링된다.

$$X^{(j)} = [x_0^{(j)}, \dots, x_{L^{(j)}-1}^{(j)}] \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, d \quad (1)$$

여기서 $L^{(j)}$ 는 $X^{(j)}$ 의 충격과 응답의 최대 시간 지연을 나타낸다.

채널 출력값 즉 다중안테나의 i 번째 안테나의 수신 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} y^{(i)}(k) &= \sum_{j=1}^d X^{(j)} A^{(j)}(k) + n^{(i)}(k) \\ &= [X^{(1)}, \dots, X^{(d)}] \begin{bmatrix} A^{(1)} \\ \vdots \\ A^{(d)} \end{bmatrix} \\ &\quad + n^{(i)}(k) \quad i=1, \dots, m \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $A^{(j)}(k)$ 는 식(3)과 같으며, $L^{(j)}$ 는 j 번째 송신신호가 겪는 심볼간의 간섭 길이($L^{(j)}$)중 제일 긴 것을 나타낸다. 또한 $n^{(i)}(k)$ 는 i 번째 안테나에 더해지는 가우시안 잡음이다.

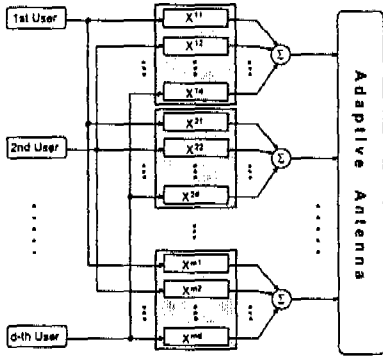


그림 1. 다중입력 다중출력 채널 모델링

$$A^{(j)}(k) = [a^{(j)}(k), \dots, a^{(j)}(k-L^{(j)}+1)]^T \quad j=1, \dots, d \quad (3)$$

즉, 각 안테나의 수신신호는 d 의 사용자 신호가 각각 다른 경로를 통해 들어온 신호가 중첩된 것이다.

시간 k 에서 m 개의 안테나에 수신된 신호를 행렬로 표시하면 다음 식과 같다.

$$Y(k) = XA(k) + N(k) \quad (4)$$

여기서 입력 벡터 $A(k)$, 출력벡터 $Y(k)$, 채널 충격과 응답 벡터 X , 잡음 벡터 $N(k)$ 는 다음의 식들처럼 각각 정의된다.

$$Y(k) = \begin{pmatrix} y^{(1)}(k) \\ \vdots \\ y^{(m)}(k) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$A(k) = [A^{(1)}(k), \dots, A^{(d)}(k)]^T \quad (6)$$

$$X = \begin{pmatrix} X^{(11)} & \dots & X^{(1d)} \\ \vdots & & \vdots \\ X^{(m1)} & \dots & X^{(md)} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$N(k) = \begin{pmatrix} n^{(1)}(k) \\ \vdots \\ n^{(m)}(k) \end{pmatrix} \quad (8)$$

만약 안테나에 수신된 신호를 심볼율보다 빠르게 표본화할 경우 차원이 증가하게 된다. 즉 심볼율보다 P 배 빠르게 표본화하면 사용하는 안테나의 수는 $P \times m$ 을 사용한 것과 똑같이 모델링 된다.

III. 다중 사용자 간섭 제거 시스템

여러명의 사용자 신호가 들어오고 있을 때, 찾고자 하는 신호가 하나일 경우, 원하는 신호를 제외하고

나머지 사용자의 신호는 간섭으로 작용한다. 즉 시스템은 여러개의 입력에 출력은 원하는 하나만을 취하는 것으로 모델링된다.

원하는 입력신호를 복구하기 위해서는 각 안테나마다 K 개의 탭으로 이루어진 선형등화기를 그림 2처럼 달아준다. 선형등화기는 안테나마다 달아주기 때문에 시간적인 처리를 하는 등화기와 공간적인 처리를 하는 다중안테나가 결합한 공간적-시간적(spatio-temporal)등화 구조이다.

등화기 출력은 다음과 같다.

$$z(k) = \sum_{i=1}^m C^{(i)}(k) Y^{(i)}(k) \quad (9)$$

여기서 $Y^{(i)}(k) = [y^{(i)}(k), \dots, y^{(i)}(k-K+1)]^T$ 는 시간 k 에서 i 번째 안테나의 입력벡터이고 $C^{(i)}(k) = [c^{(i)}(k), \dots, c^{(i)}(k-K+1)]$ 는 i 번째 안테나의 연결된 등화기의 탭 계수 벡터이다. 또한 K 는 등화기의 탭 수를 나타낸다.

등화기의 목적은 왜곡없이 찾고자 하는 임의의 신호 $a^{(j)}(k)$ 를 복구하는 것이다. 만약 더해지는 가우시안 잡음을 고려하지 않으면 등화된 전체시스템은 다음 식과 같은 임펄스 응답을 갖는 등화기를 찾으면 된다.

$$S_j(k) = C(k) * X^{(j)} = \delta(k) \quad (10)$$

$$S_j(k) = C(k) * X^{(i)} = 0 \quad i \neq j$$

여기서 $C(k) = [C^{(1)}(k), \dots, C^{(m)}(k)]$ 는 안테나에 연결된 모든 등화기의 탭 계수 벡터이고 $X^{(j)} = [X^{(j1)}, \dots, X^{(jm)}]$ 는 j 번째 사용자로부터 모든 안테나에 들어온 충격과 응답이다.

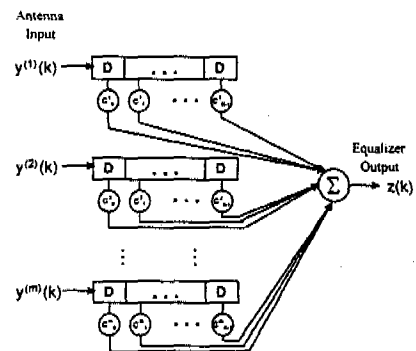


그림 2. 적응 안테나 구조

블라인드 등화기에서는 송신신호 $a^{(j)}(k)$

($i=1 \dots d$)의 통계적 성질만을 알 수 있고 정확한 송신열은 알 수가 없다. 일반적으로 송신 신호점은 대칭을 이루고 있다. 신호의 통계적인 성질을 이용하는 일반적인 등화 알고리즘은 CMA이며, 본 논문에서는 다단계 반경-지향 알고리즘과 그 성능을 비교한다. CMA의 비용함수는 다음과 같다^{[5][6][8][10][11]}.

$$\psi(z(k)) = E[|z(k)|^2 - R_2]^2 \quad (11)$$

여기서 R_2 는 송신 신호의 4승 평균과 자승 평균의 비 ($= \frac{E\{|a(k)|^4\}}{E\{|a(k)|^2\}}$)이다.

샘플 시간 k 에서 i 번째 안테나에 대한 등화기의 탭계수 벡터를 $C^{(i)}(k)$ 라하고, 입력 데이터 벡터를 $Y^{(i)}(k)$ 라 하면, 등화기의 탭 조정식은 다음과 같다^{[10][11]}.

$$C^{(i)}(k+1) = C^{(i)}(k) - \mu Y^{(i)*}(k) z(k) [|z(k)|^2 - R_2] \quad (12)$$

여기에서 $i=1, 2, \dots, m$ 이고 μ 는 수렴을 위한 스텝크기이다.

또한 다음 식과 같은 탭계수 조정식의 CMA를 기초로한 다단계 반경-지향 알고리즘도 이용할 수 있다^{[12][13]}.

$$C^{(i)}(k+1) = C^{(i)}(k) - \mu Y^{(i)*}(k) z(k) [|z(k)|^2 - M_k] \quad (13)$$

$$k=1, \dots, N$$

여기서 M_k 는 송신 신호 집합을 집합분할하여 만든 다단계 반경-지향 알고리즘의 기준 반경이고, N 은 기준 반경의 개수이다.

위에서 사용되는 등화기는 다중사용자 환경에서 입력 사용자 신호중 임의의 하나를 복구할 수 있으며, 심볼간의 간섭을 제거하고 동일 채널 간섭과 인접 채널 간섭을 억제할 수 있다. 복구된 신호는 CMA를 기초로 하는 알고리즘을 이용하므로 위상이 왜곡되어 있으며, 블라인드 알고리즘을 이용하므로 찾은 신호가 어떤 사용자의 신호인지 확인할 수가 없다. 위상의 왜곡은 CMA를 기초로 하는 알고리즘의 비용함수에 영향을 주지 않는 차등부호화를 이용하여 해결할 수 있다. 그리고 사용자를 분간할 수 없는 것은 모든 사용자가 똑같은 통계적 특성을 갖는 신호를 보내므로 블라인드 알고리즘만으로는 해결할 수가 없다.

IV. 다중 사용자 신호 검출 시스템

여러명의 사용자의 신호가 들어왔을 때, 사용자 신호를 모두 찾기 위해서는 앞절에서 임의의 한 사용자를 찾는 블라인드 등화기가 사용자 수만큼 필요하다. 만약 앞절의 등화기를 사용자 만큼 병렬로 연결하면 그림 3과 같다. 즉 K 개의 탭을 갖은 m 개의 선형등화기가 사용자 수 d 만큼 필요하다.

j 번째 사용자를 찾는 등화기들의 출력은 다음과 같다.

$$z^{(j)}(k) = \sum_{i=1}^m C^{(ij)}(k) Y^{(i)}(k) \quad (14)$$

여기서 $C^{(ij)}(k)$ 는 j 번째 사용자를 찾기 위한 등화기 단에서 i 번째 선형등화기로 다음 식과 같은 탭계수를 갖는다.

$$C^{(ij)}(k) = [c_k^{(ij)}, \dots, c_{k-K+1}^{(ij)}] \quad (15)$$

$$i=1, \dots, m \quad j=1, \dots, d$$

모든 등화기의 출력은

$$Z(k) = \begin{pmatrix} z^{(1)}(k) \\ \vdots \\ z^{(d)}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C^{(11)}(k) & \dots & C^{(1m)}(k) \\ \vdots & & \vdots \\ C^{(d1)}(k) & \dots & C^{(dm)}(k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y^{(1)}(k) \\ \vdots \\ Y^{(m)}(k) \end{pmatrix} \quad (16)$$

이다. 여기서 등화기 출력 벡터 $Z(k)$ 와 등화기 계수 행렬 $C(k)$ 이다.

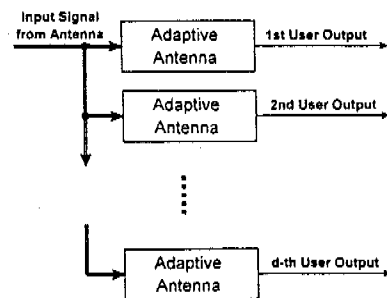


그림 3. 병렬 연결 구조

등화기의 목적은 왜곡없이 찾고자 하는 다중 사용자의 신호를 복구하는 것이다. 더해지는 가우시안 잡

음을 고려하지 않을 경우 다음식과 같은 임펄스 응답을 갖는 등화기를 찾는 것이다.

$$S(k) = C(k) * X = \delta(k) I_d \quad (17)$$

여기서 I_d 는 $d \times d$ 의 단위(identity)행렬이다.

다중사용자를 찾기 위하여 j 번째 사용자를 위해 CMA를 이용하면 비용함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Psi(z^{(j)}(k)) = E[|z^{(j)}(k)|^2 - R_2]^2 \quad j=1, \dots, d \quad (18)$$

샘플 시간 k 에서 사용자 j 를 위한 등화기들 중에서 i 번째 등화기의 탭계수 벡터 $C_{ij}(k)$ 의 탭 계수 조정식은 다음과 같다.

$$C^{(ij)}(k+1) = C^{(ij)}(k) - \mu Y^{(i)*}(k) z^{(j)}(k) [|z^{(j)}(k)|^2 - R_2] \quad i=1, \dots, m \quad j=1, \dots, d \quad (19)$$

똑같이 다음과 같은 단단계 반경-지향 알고리즘의 탭 계수 조정식을 이용할 수 있다.

$$C^{(ij)}(k+1) = C^{(ij)}(k) - \mu Y^{(i)*}(k) z^{(j)}(k) [|z^{(j)}(k)|^2 - M_k] \quad i=1, \dots, m \quad j=1, \dots, d \quad k=1, \dots, N \quad (20)$$

블라인드 등화기를 동작시킬 때, 각 등화기가 같은 초기값을 가지고 있다면 등화기 입력이 모두 같기 때문에 탭 조정 과정이 같을 것이고 수렴 후에도 각 등화기는 똑같은 출력을 나타낼 것이다. 그러나 Papadias와 Paulraj는 초기값을 다르게 주어 등화기를 병렬로 연결했을 경우 사용자를 분리할 수 있다고 하였다. 하지만 초기값을 찾는 방법을 제시하지 못하였다. 그러므로 다중 사용자를 분리하기 위해서는 단순히 등화기를 여러개 달아 주는 것으로 해결할 수 없다.

1. 직렬연결 구조

채널을 통과한 신호 $Y(k)$ 를 사용하면 임의의 한 사용자의 신호를 찾을 수 있다. 한 사용자를 찾을 수 있다면 이 사용자가 수신 신호 $Y(k)$ 에 영향을 주는 성분을 찾아 제거시킬 수 있다. 즉 그림 4와 같이 등화기 출력 $z^{(j)}(k)$ 를 사용하여 입력신호 $a^{(j)}(k)$ 가 수신신호 $Y(k)$ 로 영향을 준 성분 $\hat{Y}_j(k)$ 만큼 빼주어 새로운 수신 신호 $Y^{(1)}(k)$ 를 만든다. $\hat{Y}_j(k)$ 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{Y}_j(k) = \begin{pmatrix} \hat{y}_1^{(j)}(k) \\ \vdots \\ \hat{y}_m^{(j)}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w^{(1j)}(k) \\ \vdots \\ w^{(mj)}(k) \end{pmatrix} \hat{A}^{(j)}(k) = W^{(j)} \hat{A}^{(j)}(k) \quad (21)$$

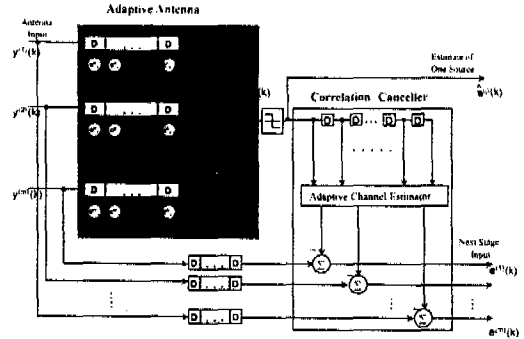


그림 4. 새로운 등화기 입력 신호 발생회로(MISO Stage)

여기서

$\hat{A}^{(j)}(k) (= \hat{a}^{(j)}(k), \dots, \hat{a}^{(j)}(k-L+1))$ 는 첫 번째 등화기 단에서 찾은 j 번째 사용자의 송신신호이다. $W^{(j)}(k)$ 는 j 번째 사용자가 i 번째 안테나에 영향을 주는 성분을 구하기 위한 L 의 계수를 갖는 필터이다.

$$W^{(j)}(k) = [w_k^{(ij)}, \dots, w_{k-L+1}^{(ij)}] \quad i=1, \dots, m \quad (22)$$

각 필터의 탭 계수 값은 다음과 같이 LMS 알고리즘을 이용하여 구할 수 있다.

$$W^{(j)}(k+1) = W^{(j)}(k) - \delta \hat{A}^{(j)}(k) e^{(1j)}(k) \quad (23)$$

여기서 $e^{(1j)}(k)$ 는 다음 식과 같은 값으로 다음 단의 입력 $Y^{(1)}(k)$ 으로 이용되는 값이다.

$$e^{(1j)}(k) = \begin{pmatrix} y_1(k) - \hat{y}_1^{(j)}(k) \\ \vdots \\ y_m(k) - \hat{y}_m^{(j)}(k) \end{pmatrix} = Y(k) - \hat{Y}_j(k) = Y^{(1)}(k) \quad (24)$$

$Y^{(1)}(k)$ 는 첫 번째 등화기 단에서 찾은 사용자 $a^{(j)}(k)$ 에 의한 성분은 제거되었으므로, $Y^{(1)}(k)$ 를 이용하여 새로운 사용자 $a^{(2)}(k)$ 를 찾는 새로운 등화기 단을 앞단과 동일한 구조로 구성할 수 있다. 즉 다음 식과 같이 두 번째 사용자를 찾는 등화기 출력이 나온다.

$$z^{(2)}(k) = \sum_{j=1}^m C^{(2j)}(k) Y^{(1)}(k) \quad (25)$$

두 번째 사용자를 위한 등화기의 탭 계수 조정식은 CMA를 이용할 경우 다음과 같이 주어진다.

$$C^{(2i)}(k+1) = C^{(2i)}(k) - \mu Y_{(i)}^{(j)*}(k) z^{(2i)}(k) [|z^{(2i)}(k)|^2 - R_2]$$

$$i = 1, \dots, m \quad (26)$$

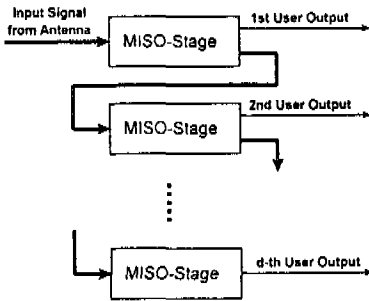


그림 5. 직렬 연결 구조

그 다음 $a^{(2)}(k)$ 가 안테나에 영향을 주는 성분을 $W^{(2)}(k)$ 의 적응 필터를 이용하여 $\hat{Y}_2(k)$ 를 찾아준 다음 $Y_{(1)}(k)$ 에서 빼준다.

$$Y_{(2)}(k) = Y_{(1)}(k) - \hat{Y}_{(2)}(k) \quad (27)$$

$Y_{(2)}(k)$ 는 $W^{(2)}(k)$ 을 적응시키기 위한 오차성분이면서 그 다음 새로운 사용자를 찾기 위한 입력이 된다. 그림 5와 같이 계속하여 같은 구조의 단을 연결하여 다음 식과 같이 모든 사용자를 찾을 수 있다.

$$z^{(n)}(k) = \sum_{i=1}^m C^{(ni)}(k) Y_{(i)}^{(j)}(k) \quad (28)$$

모든 사용자의 탭 계수 조정식은

$$C^{((n+1)i)}(k+1) = C^{((n+1)i)}(k) - \mu Y_{(i)}^{(j)*}(k) z^{(n+1)}(k)$$

$$[|z^{(n+1)}(k)|^2 - R_2] \quad i = 1, \dots, m \quad n = 0, \dots, d-1 \quad (29)$$

이다.

CMA대신에 다단계 반경-지향 알고리즘을 사용하면 탭 계수 조정식은

$$C^{((n+1)i)}(k+1) = C^{((n+1)i)}(k) - \mu Y_{(i)}^{(j)*}(k) z^{(n+1)}(k) [|z^{(n+1)}(k)|^2 - M_k]$$

$$i = 1, \dots, m \quad n = 0, \dots, d-1 \quad k = 1, \dots, N \quad (30)$$

이다.

입력의 사용자 $\hat{A}^{(j)}(k)$ 를 찾은 다음 $\hat{A}^{(j)}(k)$ 가 수신신호 $Y(k)$ 에 영향을 주는 성분을 제거하기 위해 $\hat{Y}_j(k)$ 를 계산하는데, 만약 이 과정에서 송신신호 $A^{(j)}(k)$ 와 추정신호 $\hat{A}^{(j)}(k)$ 가 정확히 일치해야 하고 $\hat{Y}_j(k)$ 를 계산하고자 하는 적응 필터 $W^{(j)}$ 가 완벽히 동작해야 한다. 만약 그렇지 못할 경우 다음 단계 들어가는 $Y_{(1)}(k)$ 의 값은 새로운 사용자를 찾기가 어려워지고 단계가 계속될수록 다음 사용자를 찾기가 더욱 어려워진다. 즉 첫 번째 블라인드 등화기 단의 오차성분이 다음 단의 블라인드 등화기에 영향을 주는 오류 전파 현상이 발생한다. 그러므로 사용자 신호를 분리하기 위해서는 앞단의 성능이 가장 중요한 요소이다.

2. 하이브리드 연결 구조

블라인드 등화기는 오직 송신 신호의 통계적 특성만을 이용하므로 수렴 후 등화기 출력에서 $\hat{A}^{(j)}(k) \neq A^{(j)}(k)$ 일 경우가 자주 발생하고, 수신 신호만을 가지고 완벽한 채널 추정을 하기가 어려워 $W^{(j)}$ 가 최적의 값을 갖지 않을 수 있다. 직렬 구조의 경우 앞단의 성능이 뒤단에 큰 영향을 주므로 전단의 오차가 누적되어 다음 단계에서는 사용자의 신호를 찾지 못하는 오류 전파 현상은 피할 수 없는 큰 문제이다.

오류 전파 현상 문제가 없는 병렬 연결 구조는 Papadakis와 Paulraj가 제안하였지만 초기값을 찾을 수 없으므로 인해 사용할 수 없다. 하지만 초기값만 찾을 수 있으면 병렬 연결 구조가 사용될 수가 있다. 앞의 직렬 구조 연결에서 임의의 첫 번째 사용자 $\hat{A}^{(1)}(k)$ 를 찾은 다음 그 첫 번째 사용자 $\hat{A}^{(1)}(k)$ 를 이용하여 두 번째 사용자를 찾기 위해 새로운 수신신호 $Y_{(1)}(k)$ 신호를 만들어 주었다. 새로운 수신신호 $Y_{(1)}(k)$ 는 직렬 연결에서는 다음 단의 입력으로 사용하였으나, 하이브리드 구조는 두 번째 단의 초기값을 찾아주는데만 사용한다. 즉 그림 6처럼 새로운 수신신호 $Y_{(1)}(k)$ 를 가지고 식(29) 또는 식(30)의 블라인드 등화 알고리즘을 수행하여 초기값을 찾은 다음, 병렬 연결 구조처럼 수신신호 $Y(k)$ 를 가지고 식(19) 또는 식(20)을 이용하여 새로운 임의의 사용자 $\hat{A}^{(2)}(k)$ 를 찾는다. 다음 단은 수신신호 $Y(k)$ 에서 $\hat{A}^{(1)}(k)$ 와 $\hat{A}^{(2)}(k)$ 의 성분을 제거한 새로운 수신신호 $Y_{(2)}(k)$ 를 가지고 직렬 연결 구조의 다음 단을 동작시켜 병렬 구조의 다음 단의 초기값을 찾는

다. 계속하여 위의 과정을 반복 수행하여 모든 사용자를 분리한다.

이 알고리즘은 단순히 초기값만을 찾기 때문에 $\hat{A}^{(l)}(k) \neq A^{(l)}(k)$ 인 경우가 발생하더라도 다음 단계 큰 영향을 미치지 않는다. 또한 등화기의 초기값이 잘못되어 등화기의 출력이 같은 사용자가 나올 경우에는 새로운 초기값 만을 다시 잡아 주면 된다.

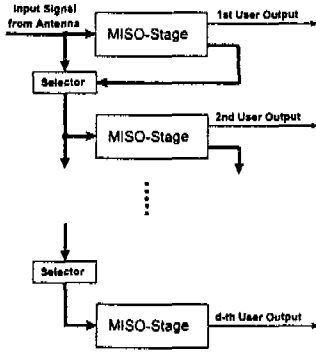


그림 6. 하이브리드 연결 구조

V. 실험 결과 및 고찰

각 사용자는 독립적인 16QAM신호를 전송하며 동일한 신호 전력으로 전송한다고 가정한다. 더해지는 가산잡음은 신호에 비해 50dB 작게 해준다. 사용자가 2명인 경우에는 2개의 안테나로 수신한다고 가정하고 실험에 사용하는 충격파 응답은 표 1과 같다.

표 1. 2명의 사용자 경우 채널 충격파 응답

	안테나 1	안테나 2
사용자 1	$-0.5666 + 0.4246z^{-1}$	$-1.1293 + 0.7666z^{-1}$
사용자 2	$-0.7926 + 0.0598z^{-1}$	$0.3569 - 0.2744z^{-1}$

사용자가 3명인 경우에는 배열 안테나를 이용한다. 송신필터는 $\alpha=0.35$ 인 상승 코사인 펄스를 사용하고 $1 \leq 3T$ 구간만 이용한다. 배열 안테나는 $\lambda/2$ 씩 떨어져있으며 8개를 이용한다. 각 사용자 신호는 3개의 경로를 통과하여 수신된다고 가정한다. 각 경로의 특징은 표 2와 같다.

다단계 방식의 기준 반지름의 수는 1, 3의 두단계로 하였다. 기준 반지름 1개인 경우 반지름의 제공값은 CMA의 R_2 와 같게 13.2로 하였고 3개인 경우는

각각 2, 10, 18로 하였다. d_i 의 값은 23으로 하였으며, 95%의 신뢰도를 갖는 기준 평균값 $m(d_i)$ 은 2.3238이다. 평균값을 위한 β 는 0.95를 사용하였다.

표 2. 3명의 사용자 경우 채널 특성

사용자 1	θ	-10°	-2°	-60°
	τ	0	0.3	1.2
사용자 2	θ	10°	15°	-40°
	τ	0.5	0.9	1.5
사용자 3	θ	30°	-20°	-35°
	τ	0.8	1.4	2.6
	$ ap $	1.0	0.7	0.6

5-1 2명의 사용자인 경우 성능도 비교

모든 등화기의 스텝사이즈는 0.00001로 사용하였고, 신호예측에 사용하는 LMS 알고리즘을 위한 스텝사이즈는 0.0001을 사용하였다. 신호분포는 모두 40000 심볼 이후 10000 심볼을 나타낸 것이다.

성능비교는 신호 정상도를 통해 사용자 신호 분리와 간섭 제거 능력을 관찰하고 등화된 시스템의 충격파 응답을 확인하여 성능을 비교한다.

직렬연결 구조는 임의의 한 사용자의 신호를 찾은 다음, 그 신호가 통과 해온 채널을 예측하여 수신신호에서 찾은 신호를 제거하여 다음 사용자를 찾기 위한 수신신호를 만들어 주는 것이므로 첫 번째 신호를 먼저 찾아 주어야 한다. 그림 4-7(a)는 CMA를 이용하여 첫 번째 신호를 찾은 결과이다. 일반적으로 첫 번째 찾은 신호가 어떤 사용자의 신호인지를 블라인드 알고리즘으로는 분간을 할 능력이 없으므로, 찾은 신호가 두 사용자 중 어떤 것인지 수신기에서는 알 수가 없다. 하지만 일반적으로 첫 번째 찾은 신호는 수신 신호 중 전력이 큰 사용자의 것이다. 첫 번째 신호를 이용하여 두 번째 사용자를 찾은 것이 그림 7(b)이다.

그림 8은 다단계 반경-지향 방식을 사용한 경우의 결과이다. 그림 8(a)를 보면 첫 번째 찾은 신호의 신호 분포가 CMA를 사용한 경우 보다 완벽하게 신호 점을 찾아 준 것을 알 수 있다. 하지만 채널 예측 구조는 CMA의 경우와 같기 때문에 채널 예측에서 생기는 잡음은 똑같이 발생하므로, 그림 8(b)에서 볼 수 있는 것처럼 CMA와 비슷한 신호 분포를 나타낸다.

그림 9는 CMA를 이용한 하이브리드 연결 구조의

경우이다. 첫 번째 단의 구성은 직렬 연결 구조와 하이브리드 연결 구조가 같으므로 그림 9(a)의 성상도는 직렬 연결 구조의 경우와 똑같다. 하지만 그림 9(b)의 두 번째 사용자를 위한 등화기 단의 출력 신호는 그림 7(b)와 비교하여 신호점의 퍼짐이 작다. 하이브리드 연결 구조는 단순히 초기값만을 찾는 것이므로 첫 번째 단의 오차가 두 번째 단에 영향을 크게 주지 않는다. 그러므로 첫 번째 등화기 단의 출력과 비슷한 신호분포를 갖는다.

그림 10은 다단계 반경-지향 알고리즘을 사용한 경우의 결과이다. 전단의 오차에 대한 영향을 받지 않으므로 다단계 알고리즘의 완벽한 수렴 특성을 두 번째 단에서도 얻을 수 있다. 특히 두 번째 사용자가 채널의 상태가 좋아 더욱 선명히 수렴함을 확인할 수 있다.

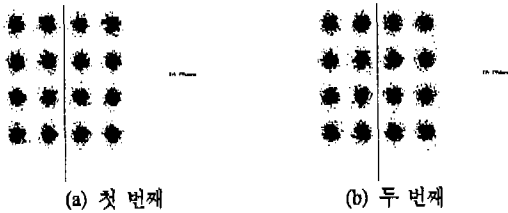


그림 7. 직렬 연결 구조에서 출력 신호 분포(CMA)

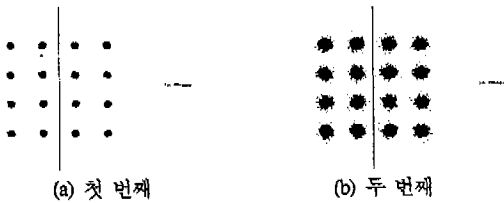


그림 8. 직렬 연결 구조에서 출력 신호 분포(다단계)

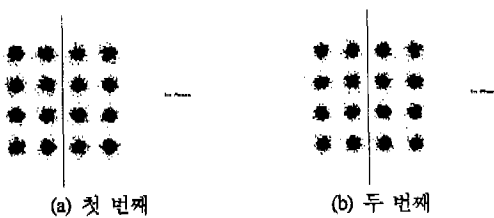


그림 9. 하이브리드 연결 구조에서 출력 신호 분포(CMA)



그림 10. 하이브리드 연결 구조에서 출력 신호 분포(다단계)

5-2 3명의 사용자인 경우 성상도 비교

모든 등화기의 스텝사이즈는 0.000001로 사용하였고, 신호예측에 사용하는 LMS 알고리즘을 위한 스텝사이즈는 0.0001을 사용하였다. 신호분포는 모두 140000심볼 이후 10000심볼을 나타낸 것이다.

그림 11은 CMA를 이용하고, 직렬 연결 구조를 사용하여 신호를 분리한 것으로 단계가 넘어가면서 신호 분포가 커져나감을 확인할 수 있다. 그림 12의 하이브리드 구조의 경우 세 사용자의 신호분포가 모두 비슷한 분포를 갖는다. 즉 각 단에서 생기는 오류의 값이 다음단에 전달되지 않는다. 그림 13과 14는 다단계 반경-지향 알고리즘의 경우로 CMA와 똑같은 특성을 보이면서, 알고리즘의 우수성으로 인해 수렴 상태는 CMA에 비교하여 좋다. 하지만 직렬 연결 구조의 경우의 그림 13(c)를 보면, 세 번째 받은 신호는 CMA와 거의 비슷한 성능을 보인다. 이는 직렬 연결 구조에서 누적되어온 오류 때문에 다단계 알고리즘이 다음 단계로 넘어가지 못하기 때문이다. 직렬 연결 구조의 오류 누적 현상을 관찰하기 위해 채널을 예측하는 상관 제거기의 스텝사이즈를 0.00001로 줄여 상관 제거기의 잔류 오차값을 적게 나오도록 하고 실험을 한 것이 그림 15에 보였다. 신호분포는 240000심볼 이후 10000심볼을 나타낸 것이다. 그림 13과 비교하여 그림 15는 아직 오류값이 누적되어 나가는 현상을 관찰할 수는 있으나 그 값이 작아져 수렴 상태가 좋아짐을 알 수 있다.

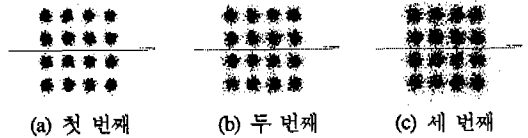


그림 11. 직렬 연결 구조에서 출력 신호 분포(CMA)

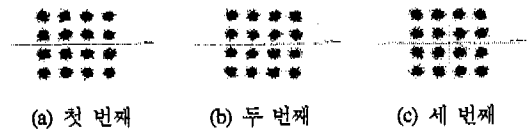


그림 12. 하이브리드 연결 구조에서 출력 신호 분포(CMA)

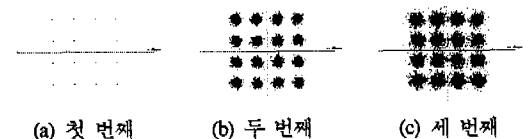
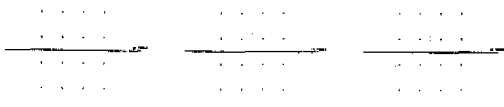
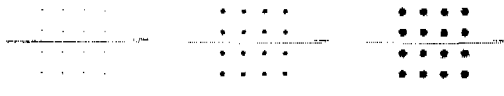


그림 13. 직렬 연결 구조에서 출력 신호 분포 (다단계, LMS 스텝사이즈 : 0.0001)



(a) 첫 번째 (b) 두 번째 (c) 세 번째
그림 14. 하이브리드 연결 구조에서 출력 신호 분포(다단계)



(a) 첫 번째 (b) 두 번째 (c) 세 번째
그림 15. 직렬 연결 구조에서 출력 신호 분포
(다단계, LMS 스텝사이즈 : 0.00001)

IV. 결론

본논문에서는 채널에서 발생하는 심볼간의 간섭뿐만 아니라 사용자간의 간섭을 제거시키는 두 개의 구조를 제안하였다. 학습 신호를 사용하지 않는 알고리즘을 이용한 경우, 단순히 등화기를 병렬로 연결하여서는 사용자의 신호를 분리할 수 없다. 그러므로 사용자 신호를 한 사용자씩 차례로 찾아나가는 직렬 연결 구조의 블라인드 등화기를 구성한다. 직렬 연결 구조의 등화기는 한 사용자의 신호를 찾고 난 다음 찾은 사용자의 성분을 제거시키고 다른 사용자를 찾는 방법이다. 그러나 직렬 연결 구조에서는 전단의 오류가 다음 단계 계속해서 전파되는 오류 전파 현상이 발생한다. 이 오류 전파 현상을 제거하기 위해 직렬 연결 구조에서는 단순히 등화기 초기값만을 찾아주고 완전한 등화는 병렬 연결 구조에서 수행하는 하이브리드 연결 구조를 제안하였다. 특히 다단계 반경-지향 알고리즘을 사용하면 일반적인 CMA를 사용한 등화기보다 좋은 성능을 보여준다.

참고 문헌

[1] S. Mayrargue, "A Blind Spatio-Temporal equalizer for a radio-mobile channel using the constant modulus algorithm," in Proc. ICASSP'93, vol 3, pp. 317-320, 1994.
[2] A. Gorokhov, P. Loubaton and E. Mouline, "Second order blind equalization in multiple input multiple output fir systems : a weighted least squares approach," in Proc. ICASSP'96, vol. 4, pp. 2415-2418, April, 1996.

[3] B. R. Petersen and D. D. Falconer, "Suppression of Adjacent-Channel, Cochannel, and Intersymbol Interference by Equalizers and Linear Combiners," IEEE Trans. Comm. vol.42, no. 12, pp. 3109-3117, Dec. 1994.
[4] A. J. van der Veen and S. Talwar and A. Paulrag, "Blind Estimation of Multiple Digital Signals Transmitted over FIR channels," IEEE Signal Processing Letters, vol 2, no. 5, pp. 99-101, May, 1995.
[5] D. Yellin and E. Weinstein, "Criteria for Multichannel Signal Separation," IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 42, no. 8, pp. 2158-2167 Aug 1994.
[6] A. J. van der Veen, "Resolution Limit of Blind Multi-User Multi-Channel Identification Schemes - the Bandlimited case," in Proc. ICASSP'96, vol 4, pp. 2722-2725, April, 1996.
[7] Y. Li and K. J. Ray Liu, "On blind equalization of MIMO channels," in Proc. ICC'96, vol 4, pp. 1000-1004, April, 1996.
[8] C. B. Papadias and A. Paulrag, "A space-time constant modulus algorithm for SDMA systems," in Proc. VTC'96, vol 4, pp. 86-90, April, 1996.
[9] J. K. Tugnait, "Blind Equalization and Channel Estimation for Multiple-Input Multiple-Output communication systems," in Proc. ICASSP'96, vol 4, pp. 2443-2446, April, 1996.
[10] D. N. Godard, "Self recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication system," IEEE Trans. on Comm., vol. COM-28, no. 11, pp. 1867-1875, Nov. 1980.
[11] J. R. Treichler and M. G. Larimore, "New processing techniques based on the constant modulus adaptive algorithm," IEEE Trans. on A.S.S.P., vol. ASSP-33, no. 4, pp. 420-431, April 1985.
[12] 이 영조, 임 승주, 이 재용, 강 창언, "QAM 시스템에서 다단계 반경-지향 알고리즘을 이용한 블라인 적응 등화," 한국통신학회 제22권, 제9호, pp. 1957~1967, 1997. 9.
[13] 이 영조, 강 성진, 강 창언, "다단계 반경-지향 알고리즘을 이용한 Fractionally Spaced 블라인드 등화," 한국통신학회 제22권, 제11호, pp. 2459~2469, 1997. 11.

