채널이 시간을 따라 바뀌지 않을 때 비동기 직접수열 다중접속 계통에서 갈퀴 수신기를 쓴 유사 최대우도 여러 쓰는이 검파

김광순 · 박소령 · 송익호 · 김홍길 · 이주식

이 논문에서는 비동기 채널에서 안테나 배열을 쓰는 역방향 연결 계통의 유사 최대우도 검파기를 살펴본다. 제안한 유사 최대우도 검파기는 안테나 배열 입력으로 빔을 만든 다음 상관을 없애는 방식이며 이제까지의 방식보다 성능이 뛰어남을 보인다. 또한 쓰는이 수와 안테나 수가 늘어날수록 이제까지의 상관없앰 방법보다 성능 이득이 커짐을 볼 수 있다.

I. 서 론

직접수열 부호분할 다중접속 방식은 여러 독특한 특징을 지니고 있고 용량이 크기 때문에 요즘 널리 각광받는 연구 분야가 되고 있다 [1] ~ [4]. 부호분할 다중접속 방식은 다른 방식들보다 대역 효율이 높고 바람직한 성질들을 많이 가지고 있기는 하지만, 쓰는이 사이 간섭과 원근 문제에서 약점을 지니고 있다. 또한, 그 큰 용량조차도 이동통신의 폭발적 수요를 충족시키기에는 모자랄 것이 예상된다. 이에, 대역 효율을 더욱 늘일 수 있는 안테나 배열 다양성 방식을 [5]에서 연구하였다. 다양성 수신은 무선 계통의 감쇄 효과를 줄이는 효과적인 방법이다. 그러나, 그것만으로는 부호분할 다중접속 방식의 용량을 늘이고, 쓰는이 사이 간섭을 없애기에 충분하지 않다. 쓰는이 사이 간섭을 없애고 원근 문제에 대처할 수 있는 여러 방식을 [6] ~ [10]에서 연구하였다. 최적 여러 쓰는이 검파기는 성능이 가장 좋으나 쓰는이 수가 늘어나면 판단 알고리즘이 지수적으로 복잡해진다. 최적 여러 쓰는이 검파기의 이러한 복잡성 때문에 여러 논문에서 몇몇 준최적 검파기를 고려하였는데 [9]에서는 간단한 준최적 여러 쓰는이 검파기로서 상관없앰 방식을 고려하였다. 서명 파형의 교차 상관 계수 행렬을 완전히 알고 있을 때 여러 쓰는이 사이 간섭을 없앨 수 있기 때문에, 이러한 계통의 성능은 이제까지의 것보다 나아진다. 그러나, 이 계통은 상관없앰기가 잡음을 커지게, 또 상관있게 하며, 교차 상관 계수와 쓰는이 수가 커질수록 그러한 단점이 더욱 커진다. 이 논문에서는 그러한 단점을 줄인 준최적 여러 쓰는이 검파 방식을 제안하고 그 성능을 살펴 보고자 한다.

II. 계통 모형

먼저, 넓은 뜻에서 정상이고 서로 관계없이 흩어지게 하는 (wide-sense stationary uncorrelated scattering) 채널을 생각하자. 또한 이 채널이 느리게 바뀌는 레일리 특성을 띤다고 두자: 곧, 채널의 동기 시간이 심볼 사이보다 매우 크다고 둔다. 이동국에서 정보 비트들에 확산 수열과 반송파를 곱한 뒤 이진 위상 천이 변조로 보낸다고 하자. 그러면, k째 쓰는이의 바탕대역 정보 신호 파형은 다음과 같다.

$$x_k(t) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} x_k(p)\, P_{T_s}(t - pT_s). \tag{1}$$

여기서, T_s는 심볼 주기이고, P_τ는 간격이 τ 인 사각 펄스이며, $x_k(p)$는 k째 쓰는이의 p째 심볼 주기에서의 바탕대역 심볼이다. 서명 파형도 아래와 같이 쓸 수 있다.

김광순, 박소령, 송익호, 김홍길, 이주식 : 한국과학기술원

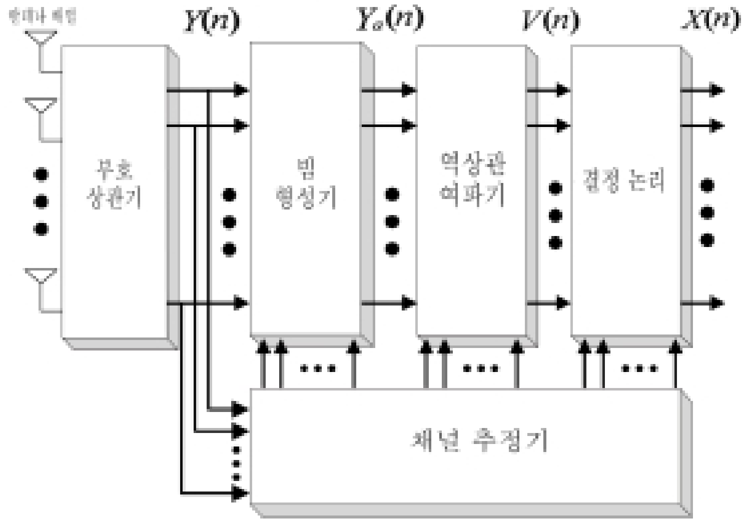


그림 1. 갈퀴 다양성을 썼을 때의 수신기 얼개

$$c_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_k(n)\, P_{T_c}(t - nT_c). \tag{2}$$

여기서, $c_k(n)$은 k째 쓰는이의 n째 칩이고, $T_c \ll T_s$이다. 이 때, 주파수가 f_c인 $(f_c \gg \frac{1}{T_c})$ 반송파로 변조한 전송 신호는 다음과 같다.

$$u_k(t) = \sqrt{P_k}\, Re\{x_k(t)\, c_k(t) \exp[\,j(2\pi f_c t + \psi_k)]\}. \tag{3}$$

여기서, ψ_k는 k째 반송파의 위상이고, P_k는 k째 쓰는이의 전송 전력이다.

갈퀴 수신기를 쓰는 때를 생각해 보자. 여러 길의 지연 확산이 신호 대역폭의 역수와 견줄만할 때, 기지국 수신기에 닿는 $M \times 1$ 신호 벡터는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{l=1}^{L} s_{k,l}(t - \tau_{k,l}) c_k(t - \tau_{k,l})\, a_{k,l} + n(t). \tag{4}$$

여기서, $s_{k,l}(t) = \sqrt{P_k}\, \alpha_{k,l}\, x_k(t) e^{j\phi_{k,l}}$이고, $\alpha_{k,l}$은 k째 쓰는이의 i째 길의 감쇄 요소이며, L은 서로 나눌 수 있는 길의 수이다. ($\psi_k = 0$이라고 둔 동기 수신에서) $\phi_{k,l} = \psi_k - 2\pi f_c \tau_{k,l}$이고, $a_{k,l}$은 k째 쓰는이의 l째 길에서의 $M \times 1$ 채널 벡터이며, $n(t)$는 공분산행렬이 σ_n^2이고 시공간적으로 백색인 $M \times$ 1덧셈 복소 정규 잡음 벡터이다. 갈퀴 다양성을 쓰는 수신기의 얼개가 그림 1에 나타나있다. 부호상관기 출력 $Y(n)$은 $M \times KL$행렬이며 다음과 같다.

$$Y(n) = [y_{1,1}(n) \cdots y_{1,L}(n)\, y_{2,1}(n) \cdots y_{2,L}(n) \cdots y_{K,1}(n) \cdots y_{K,L}(n)]. \tag{5}$$

여기서,

$$y_{p,q}(n) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{l=1}^{L} \sum_{m=-1}^{1} s_{k,l}(n+m)\, \gamma_{p,q,k,l}^{(m)}\, a_{k,l} + n_{p,q}(n) \tag{6}$$

은 q째 길에서 p째 쓰는이의 $M \times 1$ 열벡터이고,

$$\gamma_{p,q,k,l}^{(-1)} = \begin{cases} \frac{1}{T_s} \int_{\tau_{p,q}}^{\tau_{k,l}} c_k(t - \tau_{k,l}) c_p(t - \tau_{p,q}) dt & \tau_{k,l} > \tau_{p,q} \text{ 일 때,} \\ 0 & \text{그 밖에,} \end{cases} \tag{7}$$

$$\gamma^{(0)}_{p,q,k,l} = \frac{1}{T_s}\int_{\max(\tau_{p,q},\, \tau_{k,l})}^{\min(\tau_{p,q},\, \tau_{k,l}) + T_s} c_k(t - \tau_{k,l})c_p(t - \tau_{p,q})dt, \qquad (8)$$

$$\gamma^{(1)}_{p,q,k,l}$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{T_s}\int_{\tau_{k,l}}^{\tau_{p,q}} c_k(t - \tau_{k,l})c_p(t - \tau_{p,q})dt & \tau_{k,l} < \tau_{p,q} \text{ 일 때,} \\ 0 & \text{그 밖에,} \end{cases} \qquad (9)$$

는 q째 길에서 n째 심볼 구간 동안의 p째 쓰는이 서명 파형과, l째 길에서 각각 $n-1$, n, $n+1$째 심볼 구간 동안의 k째 쓰는이 서명 파형의 교차 상관 계수들이다. 그리고,

$$n_{p,q}(n) = \frac{1}{T_s}\int_{\tau_{p,q} + (n-1)T_s}^{\tau_{p,q} + nT_s} n(t)\, c_p(t - \tau_{p,q})dt \qquad (10)$$

은 $M \times 1$ 잡음 열벡터이다.

서명 파형은 이미 알고 있고, 쓰는이의 시간 지연은 여러 [5] 방법으로 추정할 수 있으므로 $\gamma^{(-1)}_{p,q,k,l}$, $\gamma^{(0)}_{p,q,k,l}$, $\gamma^{(1)}_{p,q,k,l}$,을 계산할 수 있다. 한편 $n_{p,q}(n)$과 $n_{k,l}(n+m)$의 교차 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$E\{n_{p,q}(n)\, n^H_{k,l}(n+m)\}$$

$$= \frac{1}{T_s^2}\int_{\tau_{p,q} + (n-1)T_s}^{\tau_{p,q} + nT_s}\int_{\tau_{k,l} + (n+m-1)T_s}^{\tau_{k,l} + (n+m)T_s} E\{n(t)n^H(\sigma)\} \cdot$$

$$c_{p,q}(t - \tau_{p,q})c_{k,l}(\sigma - \tau_{k,l})d\sigma dt$$

$$= \frac{\sigma_n^2 I}{T_s^2}\int_{\tau_{p,q}}^{\tau_{p,q} + T_s}\int_{\tau_{k,l}}^{\tau_{k,l} + T_s} \delta(t - \sigma - mT_s) \cdot$$

$$c_{p,q}(t - \tau_{p,q})c_{k,l}(\sigma - \tau_{k,l})d\sigma dt$$

$$= \begin{cases} \gamma^{(m)}_{p,q,k,l}\,\sigma_{n'}^{\,2} I & m = -1, 0, 1 \text{ 일 때,} \\ 0 & \text{그 밖에.} \end{cases} \qquad (11)$$

여기서, $\sigma_{n'}^{\,2} = \frac{\sigma_n^2}{T_s}$ 이다.

Ⅲ. 유사 최대우도 검파 기법

이제, (6)에서 $y_{p,q}(n)$의 우도 함수 $L_{p,q}(n)$을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{p,q}(n) = \frac{1}{(2\pi)^{M/2}(\det R_{nn,p,q})^{1/2}}$$

$$\cdot \exp\Big[- \Big(y_{p,q}(n) - \sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\sum_{m=-1}^{1}$$

$$s_{k,l}(n+m)\,\gamma^{(m)}_{p,q,k,l}\,a_{k,l}\Big)^H \cdot$$

$$R^{-1}_{nn,p,q}\Big(y_{p,q}(n) - \sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\sum_{m=-1}^{1}$$

$$s_{k,l}(n+m)\,\gamma^{(m)}_{p,q,k,l}\,a_{k,l}\Big)\Big], \qquad (12)$$

여기서, $R_{nn,p,q} = E\{n_{p,q}(n)\, n^H_{p,q}(n)\} = \sigma_{n'}^{\,2} I$, $p = 1,\cdots,K$, $q = 1,\cdots,L$이다. 이제, $\log L_{p,q}(n)$을 편미분하여 그 결과를 0으로 놓자.

$$0 = \frac{\partial \log L_{p,q}(n)}{\partial s_{p,q}(n)}$$

$$= \gamma_{p,q,p,q}\Big[a^H_{p,q}R^{-1}_{nn,p,q}y_{p,q}(n) - \sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\sum_{m=-1}^{1}$$

$$s_{k,l}(n+m)\,\gamma^{(m)}_{p,q,k,l}\,a^H_{p,q}R^{-1}_{nn,p,q}a_{k,l}\Big] \cdot \qquad (13)$$

이때, 잡음이 시공간적으로 백색이므로, 곧, $R_{nn,p,q} = \sigma_{n'} I$ 이므로, $S_{p,q}(n)$ 의 우도 추정값은 다음과 같이 간단해진다.

$$\hat{s}_{p,q}(n) = (\gamma^{(0)}_{p,q,p,q}\,\|\,a_{p,q}\,\|\,)^{-1} \cdot$$

$$\Big[a^H_{p,q}y_{p,q}(n)/\|\,a_{p,q}\,\| - \sum_{\substack{k=1 \\ (k,\, l)\neq(p,\, q)}}^{K}\sum_{l=1}^{L}\sum_{m=-1}^{1}$$

$$s_{k,l}(n+m)\gamma^{(m)}_{p,q,k,l}\,a^H_{p,q}\,a_{k,l}/\|\,a_{p,q}\,\|\Big] \cdot \qquad (14)$$

윗 식에서 $s_{k,l}(n+m)$을 추정값 $\hat{s}_{k,l}(n+m)$, $k=1, \cdots, K$, $l=1, \cdots, L$로 바꾸고 모든 쓰는이와 길을 고려하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$Y_a(n) = QW\hat{X}_a(n). \tag{15}$$

여기서,

$$Q = \Lambda^{(-1)} \cdot D + \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(1)} \cdot D^{-1}, \tag{16}$$

$$\Lambda^{(m)} = \begin{bmatrix} \gamma^{(m)}_{1,1,1,1} d_{1,1,1,1} \cdots \gamma^{(m)}_{1,1,1,L} d_{1,1,1,L} \cdots \gamma^{(m)}_{1,1,K,L} d_{1,1,K,L} \\ \cdots \quad \ddots \quad \cdots \quad \ddots \quad \cdots \\ \gamma^{(m)}_{1,L,1,1} d_{1,L,1,1} \cdots \gamma^{(m)}_{1,L,1,L} d_{1,L,1,L} \cdots \gamma^{(m)}_{1,L,K,L} d_{1,L,K,L} \\ \cdots \quad \ddots \quad \cdots \quad \ddots \quad \cdots \\ \gamma^{(m)}_{K,L,1,1} d_{K,L,1,1} \cdots \gamma^{(m)}_{K,L,1,K} d_{K,L,1,L} \cdots \gamma^{(m)}_{K,L,K,L} d_{K,L,K,L} \end{bmatrix} \tag{17}$$

이고, $W = diag([w_{1,1} \cdots w_{1,L} w_{2,1} \cdots w_{2,L} \cdots w_{K,1} \cdots w_{K,L}])$, $w_{k,l} = \sqrt{P_k}\, \alpha_{k,l} e^{j\phi_{k,l}}$, $X_a(n) = [x_{a,1,1}(n) \cdots x_{a,1,L}(n) \cdots x_{a,K,1}(n) \cdots x_{a,K,L}(n)]^T$이다. 그리고, $\hat{X}_a(n)$은 $X_a(n)$의 추정값이며, $x_{a,k,l}(n) = \| a_{k,l} \| x_k(n)$, $d_{p,q,k,l} = a^H_{p,q} a_{k,l} / \| a_{p,q} \| \| a_{k,l} \|$ 이고 $Y_a(n) = [a^H_{1,1} y_{1,1}(n) / \| a_{1,1} \| \cdots a^H_{1,L} y_{1,L}(n) / \| a_{1,L} \| \cdots a^H_{K,L} y_{K,L}(n) / \| a_{K,L} \|]^T$이다. Q의 원소가 D의 다항식이므로 Q^{-1}의 원소는 일반적으로 D의 유리 함수라는 것을 알 수 있고, 따라서, 입력이 $Y_a(n)$이고 출력이 $W\hat{X}_a(n)$인 역여파기를 설계할 수 있다.

이제, [7]과 [9]에서 연구한 것처럼 전달 함수가 $\Upsilon(Z) = (\Gamma^{(-1)} Z^{-1} + \Gamma^{(0)} + \Gamma^{(1)} Z^{1})^{-1}$인 K-입력 K-출력 상관없앰 방법을 생각해 보자. 여기서, $\Gamma^{(m)}$의 i, j째 원소는 $r^{(m)}_{i,j}$이다. 이때 여파기 출력 $B(n)$은

$$B(n) = [b_{1,1}(n) \cdots b_{1,L}(n) \cdots b_{K,1}(n) \cdots b_{K,L}(n)] \tag{18}$$

이고, 여기서,

$$b_{p,q}(n) = s_{p,q}(n)\, a_{p,q} + n_{\backprime p,q}(n), \tag{19}$$

$$E\{n_{p,q\backprime}(n)\, n^H_{\backprime p,q}(n)\} = [F(0)]_{p,q,p,q} \sigma_{\backprime n}{}^2 I, \tag{20}$$

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} F(k) Z^{-k} = \Upsilon(Z)\, R_n(Z)\, \Upsilon^H(1/Z^*) \tag{21}$$

이며, $[R]_{i,j}$는 R의 i, j째 원소이고, $R_n(Z) = \Gamma^{(-1)} Z^{-1} + \Gamma^{(0)} + \Gamma^{(1)} Z^{1}$은 잡음의 공분산 행렬을 Z-변환한 것이다. 그런데, $b_{p,q}(n)$의 공분산 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{bb,p,q}(n) &= E\{b_{p,q}(n)\, b^H_{p,q}(n)\} \\ &= P_{p,q} \alpha^2_{p,q} a_{p,q} a^H_{p,q} + [F(0)]_{p,q,p,q} \sigma_{\backprime n}{}^2 I. \end{aligned} \tag{22}$$

그러므로, 가장 큰 고유값에 대응하는 고유 벡터로서 p째 쓰는이의 채널 벡터를 추정할 수 있다. 서명 파형을 알고 있으면 $d_{p,q,k,l}$와 여파기의 계수들을 계산할 수 있고, 역여파기가 다음과 같다는 것을 쉽게 알 수 있다.

$$G(Z) = [\Lambda^{(-1)} Z^{-1} + \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(1)} Z]^{-1}. \tag{23}$$

이제까지의 상관없앰 방법에서는 빔을 만들기에 앞서 상관을 없앤다. 한편, 제안한 계통에서는 수신 신호로 먼저 빔을 만들고 다음에 상관을 없앤다. 제안한 방법은 상관없앰으로 말미암아 어쩔 수 없이 생기는 잡음 세짐과 잡음 상관을 줄일 수 있다. 이는 먼저 빔을 만들어 공간 다양성을 다양성 결합 이득을 얻는데 뿐만 아니라 쓰는이 서명 파형의 교차 상관 계수을 줄이는 데에도 쓰기 때문이다.

이제까지의 상관없앰 방법에서 k째 쓰는이의 점근 효율은 [7] 다음과 같다.

$$\bar{\eta}^d_k = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\Gamma^{(1)} e^{j\omega} + \Gamma^{(0)} + \Gamma^{(-1)} e^{-j\omega}]^{-1}_{k,k} d\omega \right]^{-1}. \tag{24}$$

한편, 제안한 계통에서 k째 쓰는이의 점근 효율은 다음과 같음을 쉽게 알 수 있다.

$$\bar{\eta}_k^{\,p} = \left[\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} [\Lambda^{(1)}e^{j\omega} + \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(-1)}e^{-j\omega}]^{-1}_{k,k} d\omega\right]^{-1}. \tag{25}$$

여기서, $\Lambda^{(1)}$, $\Lambda^{(0)}$, $\Lambda^{(-1)}$의 비대각 원소가 각각 $\Gamma^{(-1)}$, $\Gamma^{(0)}$, $\Gamma^{(1)}$의 비대각 원소보다 작으므로 제안한 계통의 점근 효율이 높다는 것을 알 수 있다. 보기를 들어, $L = 1$이고 쓰는이가 둘인 때를 생각해 보자. 먼저, 이제까지의 계통에서 첫째 쓰는이의 점근 효율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\bar{\eta}_1^{\,d} &= \left[\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} [\Gamma^{(1)}e^{j\omega} + \Gamma^{(0)} + \Gamma^{(-1)}e^{-j\omega}]^{-1}_{1,1} d\omega\right]^{-1} \\
&= \left[\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \{1 - \gamma^{(0)}_{1,2}\gamma^{(0)}_{2,1} - \gamma^{(-1)}_{1,2}\gamma^{(0)}_{2,1} \right. \\
&\qquad \left. - \gamma^{(0)}_{1,2}\gamma^{(1)}_{2,1}e^{j\omega} - \gamma^{(-1)}_{1,2}\gamma^{(0)}_{2,1}e^{j\omega}\} d\omega\right]^{-1} \\
&= 1 - (\gamma^{(0)}_{1,2}\gamma^{(0)}_{2,1} + \gamma^{(-1)}_{1,2}\gamma^{(1)}_{2,1}).
\end{aligned} \tag{26}$$

한편, $\Gamma^{(1)}_{1,2} = \Gamma^{(-1)}_{2,1} = 0$이므로, 제안한 계통에서 첫째 쓰는이의 점근 효율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\bar{\eta}_1^{\,p} &= \left[\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} [\Lambda^{(1)}e^{j\omega} + \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(-1)}e^{-j\omega}]^{-1}_{1,1} d\omega\right]^{-1} \\
&= \left[\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \{1 - d_{1,2}d_{2,1}(\gamma^{(0)}_{1,2}\gamma^{(0)}_{2,1} - \gamma^{(-1)}_{1,2}\gamma^{(1)}_{2,1} \right. \\
&\qquad \left. - \gamma^{(0)}_{1,2}\gamma^{(1)}_{2,1}e^{j\omega} - \gamma^{(-1)}_{1,2}\gamma^{(0)}_{2,1}e^{j\omega})\} d\omega\right]^{-1} \\
&= 1 - d_{1,2}d_{2,1}(\gamma^{(0)}_{1,2}\gamma^{(0)}_{2,1} + \gamma^{(-1)}_{1,2}\gamma^{(1)}_{2,1}).
\end{aligned} \tag{27}$$

여기서, $d_{1,2}d_{2,1} = \| a_1^H a_2 \|^2 / \| a_1 \|^2 \| a_2 \|^2 < 1$이므로 a_1이 a_2의 상수배가 아니면, 이제까지의 계통보다 제안한 계통의 점근 효율이 더 높다는 것을 알 수 있다.

IV. 성능 분석

먼저, 첫째 쓰는이의 신호를 바라는 신호라 하자. 첫째 쓰는이의 여파기 출력은 다음과 같다.

$$V_1(n) = W_1 x_1(n) + N_{g,1}(n). \tag{28}$$

여기서, $N_{g,1}(n) = [n_{g,1,1}(n)\ n_{g,1,2}(n) \cdots n_{g,1,L}(n)]^T$은 $N_g(n) = [N^T_{g,1} N^T_{g,2} \cdots N^T_{g,k}]^T$의 첫 열이고, $W_1 = [w_{1,1} \| a_{1,1} \| w_{1,2} \| a_{1,2} \| \cdots w_{1,L} \| a_{1,L} \|]^T$이다. 잡음 벡터의 상관 행렬의 Z-변환은 $R_n(Z) = \Lambda^{(-1)}Z^{-1} + \Lambda^{(0)} + \Lambda^{(1)}Z$이다. 여파기를 지난 정규 잡음의 공분산 행렬을 $T(0)$이라 하고 ij째 원소가 $T(0)$의 ij째 원소인 $L \times L$행렬을 $[T(0)]_L$이라 둘 때, $N_{g,1}(n)$의 상관 행렬은 $\sigma_n^2 [T(0)]_L$이다. 그러므로 콜레스키 분해법으로 $(\Phi_1^{-1})(\Phi_1^{-1})^H = [T(0)]_L$인 $L \times L$ 행렬 Φ_1을 얻을 수 있다 [11]. 그러면, Φ_1을 거친 결과는 다음과 같다.

$$\upsilon_{1,w}(n) = \Phi_1 W_1 x_1(n) + n_{1,w}(n). \tag{29}$$

여기서, $E\{n_{1,w}(n)\ n^H_{1,w}(n)\} = \sigma_n^2 I$ 이다. 최대율 결합 (maximum ratio combining) 위상 동기 수신을 가정하면 결정 변수 $\rho_1(n)$을 얻을 수 있고,

$$\begin{aligned}
\rho_1(n) &= W_1^H \Phi_1^H \upsilon_{1,w}(n) \\
&= W_1^H \Phi_1^H \Phi_1 W_1 x_1(n) + W_1^H \Phi_1^H n_{1,w}(n),
\end{aligned} \tag{30}$$

$\rho_1(n)$의 순간 신호대 잡음비 v_1은

$$\begin{aligned}
v_1 &= \frac{(W_1^H(\Phi_1^H \Phi_1)W_1)^2}{2\sigma_n^2 W_1^H(\Phi_1^H\Phi_1)W_1} \\
&= \frac{E_1 \tilde{W}_1^H([T(0)]_L)^{-1}\tilde{W}_1}{2\sigma_n^2}
\end{aligned} \tag{31}$$

이며, $W_1 = \tilde{W}_1 \sqrt{P_1}$ 이다. 여기서, $\tilde{W}_1$는 평균이 0이고 공분산 행렬이 $R_{\tilde{W}_1\tilde{W}_1} = diag(\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_L)$인 복소 정규 행렬이고, $\mu_i = E\{\alpha^2_{1,i}\}a_1^H a_1$이다. $R_{\tilde{W}_1\tilde{W}_1}([T(0)]_L)^{-1}$이 대칭 행렬이므로 [12]의 결과를 써서 $\rho_1(n)$의 특성 함수

$$C_{\rho_1}(\omega) = \frac{1}{\prod_{j=1}^{L}(1 + 2j\omega\xi_{1,j})} \tag{32}$$

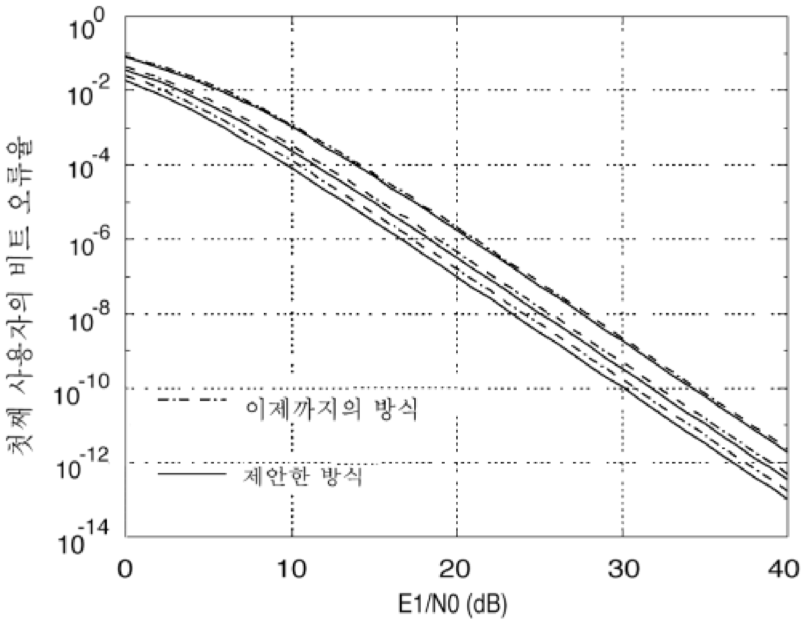


그림 2. 쓰는이 수 10, 서로 나눌 수 있는 길 수 3, 안테나 수 2, 3, 4이고, 골드 수열의 주기는 63,
레일리 분포의 매개변수는 0.1일 때, 두 방식의 비트 오류율

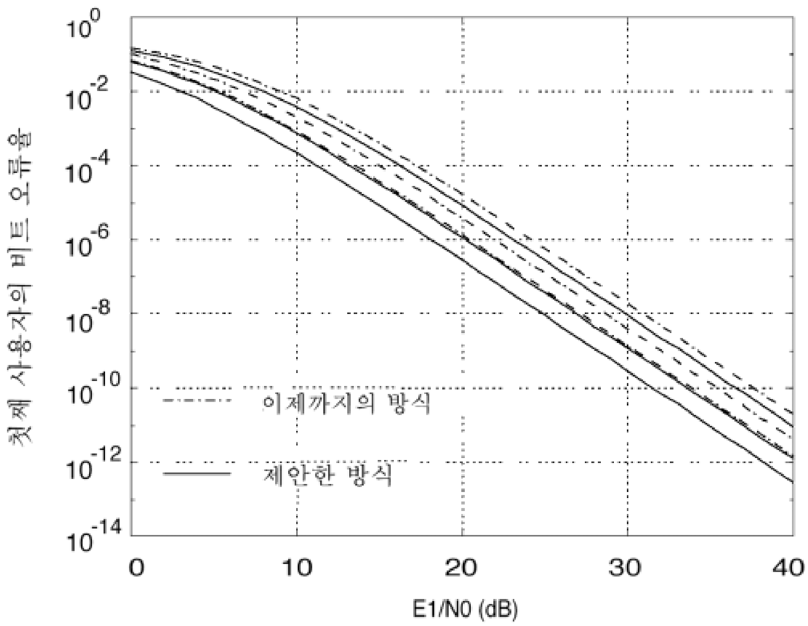


그림 3. 쓰는이 수 15, 서로 나눌 수 있는 길 수 3, 안테나 수 2, 3, 4이고, 골드 수열의 주기는 63,
레일리 분포의 매개변수는 0.1일 때, 두 방식의 비트 오류율

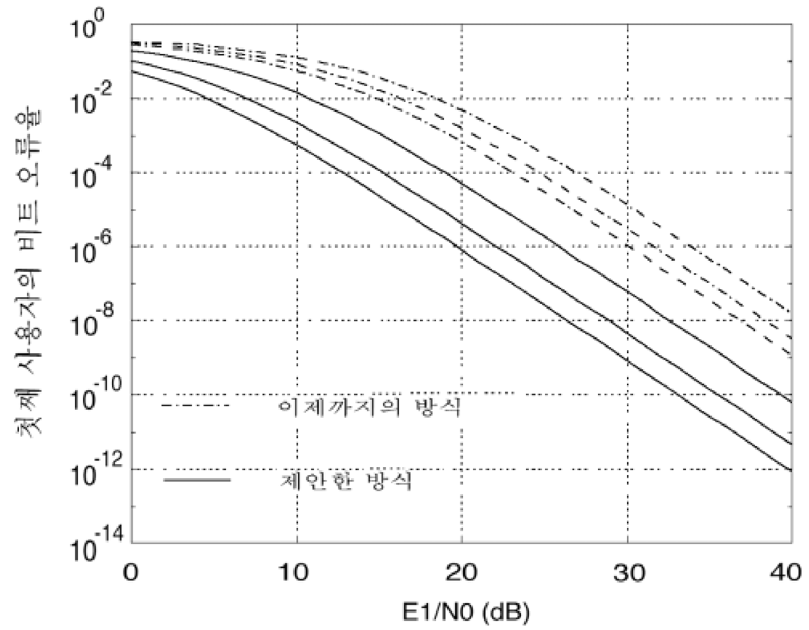


그림 4. 쓰는이 수 20, 서로 나눌 수 있는 길 수 3, 안테나 수 2, 3, 4이고, 골드 수열의 주기는 63, 레일리 분포의 매개변수는 0.1일 때, 두 방식의 비트 오류율

를 얻을 수 있다. 여기서, $\xi_{1,j}$는 $R_{W_1W_1}([T(0)]_L)^{-1}$의 고유값이다. 이제, [13]의 결과를 쓰면 비트 오류율은 다음과 같다.

$$P_{b,1} = \int_0^\infty \frac{1}{2} erfc(\sqrt{x}) f_{v_1}(x)dx$$

$$= \sum_{l=1}^{L} \frac{\pi_{1,l}}{2}\left[1-\sqrt{\frac{\chi_{1,l}}{1+\chi_{1,l}}}\right]. \qquad (33)$$

여기서, $\pi_{1,l} = \prod_{j=1, j\neq l}^{L} \frac{\xi_{1,l}}{\xi_{1,l}-\xi_{1,i}}$ 이고 $\chi_{1,l} = \frac{E_1\xi_{1,l}}{2\sigma_n^2}$이다.

위에서 구한 비트 오류율로 제안한 방식의 성능을 보이고자, 서로 나눌 수 있는 길마다 위상이 $[0, 2\pi]$에 고르게 퍼져있는 배열 응답 벡터 20개의 선형 조합으로 채널 응답 벡터를 만들었다. 계수들은 복소 정규 확률 분포를 따르고 그 합이 1이 되도록 만들었다. 서로 나눌 수 있는 길의 시간 지연 $\tau_{k,l}$도 고르게 퍼져있다고 둔다. 길이 63인 골드 부호를 쓰고 모든 길에서 레일리 매개변수를 0.1로 $(E\{\alpha^2\} = 0.1)$ 두었다.

그림 2 ~ 그림 4는 서로 나눌 수 있는 길이 3개, 쓰는이가 각각 10, 15, 20명일 때 두 방식의 비트 오류율을 계산한 결과이다. 실선은 제안한 방식의 비트 오류율 곡선이고, 점선은 이제까지 방식의 곡선이다. 안테나와 쓰는이가 많아지면, 이제까지의 방식보다 성능 이득이 커짐을 볼 수 있다. 곧, 제안한 방식을 써서 높은 대역 효율을 얻을 수 있고, 쓰는이와 안테나가 많아질수록 이제까지의 상관없앰 방식보다 제안한 방식의 성능 이득이 커진다는 것을 뚜렷이 알 수 있다.

V. 결 론

이 논문에서는 비동기 채널에서 안테나 배열을 쓰는 유사 최대 우도 검파기를 제안하였다. 이제까지의 방식은 먼저 상관을 없앤 뒤에 빔을 만들지만, 제안한 유사 최대우도 검파기는 먼저 빔을 만든 뒤 상관을 없애는 방식으로 생각할 수 있다. 채널의 매개변수를 추정하고자 역여파한 신호의 상관 행렬 고유 분해법을 바탕으로 한 방법을 생각하였다. 또한 제안한 방식의 성능을 분석하여, 이제까지 방식의 큰 결점인 잡음 세짐과 잡음 상관을 줄일 수 있음을 보았다. 이제까지의 상관없앰 방식보다 성능이 좋음을 보일 수 있고 쓰는이와 안테나가 많아지면 그 차이가 더욱 커짐을 보았다. 그러므로, 이제까지의 상관없앰 방식보다 제안한 방식에서 훨씬 더 큰 용량을 기대할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

[1] R. L. Pickholtz, L. B. Milstein, and D. L. Schilling, "Spread spectrum for mobile communications," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. VT-40, pp. 313-322, May 1991.

[2] 김기범, 신요안, " 길쌈 부호와 이원 직교 부호에 의한 다중부호 부호분할 다원접속 시스템의 개선, " *한국통신학회논문지*, 23권 7호 1659-1666쪽, 1998년 7월.

[3] 김광순, 이주식, 윤석호, 송익호, 이민준, " 비동기 직접수열 다중접속 계통에서 갈퀴 수신기를 쓴 유사 최대우도 여러 쓰는이 검파 : 채널이 시간을 따라 바뀔 때, " *한국통신학회논문지*, 23권 6호 1583-1591쪽, 1998년 6월.

[4] 강법주, 강창언, " DS/CDMA 셀룰라 시스템에서 하이브리드 동기 획득의 성능 분석, " *한국통신학회논문지*, 23권 4호 914-925쪽, 1998년 4월.

[5] A. F. Naguib and A. Paulaj, "Performance enhancement and trade-offs of smart antennas in CDMA cellular networks," *Proc. IEEE VTC*, Chicago, IL, pp. 40-44, July 1995.

[6] R. Lupas and S. Verdu, "Near-far resistance of multiuser detector in asynchronous channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-38, pp. 496-508, April 1990.

[7] S. Verdu, "Multiuser Detection," in *Advances in Signal Processing* (H. V. Poor and J. B. Thomas, eds.), Vol. 2 : Signal Detection, pp. 369-409, CT : JAI Press, 1992.

[8] C. Kchao and G. Stuber, "Performance analysis of a single cell direct sequencemobile radio system," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-41, pp. 1507-1516, October 1993.

[9] Z. Zvonar, "Combined multiuser detection and diversity reception for wireless CDMA systems," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol. VT-45, pp. 205-211, February 1996.

[10] B.-P. Paris, "Finite precision decorrelating receivers for multiuser CDMA communication systems," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-44, pp. 496-507, April 1996.

[11] C. W. Therrien, *Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing*, NJ : Prentice-Hall, 1992.

[12] L. L. Scharf, *Statistical Signal Processing*, MA : Addison-Wesley, 1991.

[13] J. G. Proakis, *Digital Communication, 3rd ed.*, NY : McGraw-Hill, 1995.

김광순(金光淳)

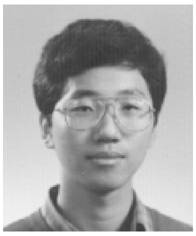
1990. 3. ~ 1994. 2.: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (학사)
1994. 3. ~ 1996. 2.: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)
1996. 3. ~ 1999. 2.: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사)
1999. 3. ~ 현재: 한국과학기술원 연수연구원
관심분야: 이동통신, 배열신호처리, 다중사용자 검파

박소령(朴昭玲)

1993. 3 ~ 1997. 2.: 연세대학교 전자공학과 (학사)
1997. 3 ~ 1999. 2.: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)
1999. 3 ~ 현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사과정)
관심분야: 통신이론, 이동통신, 신호검파

송익호(宋翊鎬)

1978. 3. ~ 1982. 2.: 서울대학교 전자공학과 (학사)
1982. 3. ~ 1984. 2.: 서울대학교 전자공학과(석사)
1984. 1. ~ 1985. 8.: 펜실베니아대학교 전기공학과 (석사)
1985. 9. ~ 1987. 5.: 펜실베니아대학교 전기공학과 (박사)
1987. 3. ~ 1988. 2.: 벨 통신연구소 연구원
1988. 3. ~ 1991. 8.: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 조교수
1991. 9. ~ 1998. 8.: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수
1998. 9. ~ 현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수
1995. 1. ~ 현재: 한국통신학회 논문지 편집위원
1996. 1. ~ 현재: 한국음향학회 영문논문지 편집위원
1998. 1. ~ 현재: Journ. Comm., Networks 편집위원
관심분야: 통계학적 신호처리와 통신이론, 신호검파와 추정, 이동통신



김홍길(金洪吉)
1991. 3. ~ 1995. 2.: 한양대학교 전자통신공학과 (학사)
1995. 3. ~ 1997. 2.: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)
1997. 3. ~ 현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사과정)
관심분야: 이동통신, 검파이론

이주식(李柱植)
1992. 3 ~ 1996. 2.: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (학사)
1996. 3 ~ 1998. 2.: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (석사)
1998. 3 ~ 현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (박사과정)
관심분야: 배열신호처리, 신경회로망, 이동통신