

나카가미 간섭에서 사용자 검파기의 해석

正會員 배진수*, 이주식*, 김석찬*, 송익호*

Analysis of a User Detection Scheme in Nakagami Interference

Jinsoo Bae*, Jooshik Lee*, Suk Chan Kim*, Ickho Song* *Regular Members*

요약

이 논문에서는 바라는 사용자가 있는지를 검파하는 문제를 다루었다. 다른 사용자들의 간섭이 충분히 커서 잡음의 효과를 무시할 수 있다고 두었고, 사용자들 사이의 간섭과 사용자 신호들을 나카가미 모형으로 나타냈다. 이러한 상황에서 관측모형을 제안하고, 그 모형을 바탕으로 국소최적 검파기의 검정통계량을 얻었으며, 이 검파기의 접근 성능을 포락선검파기와 견주어서, 국소최적 검파기가 포락선검파기보다 더 좋은 성능을 가짐을 보였다.

ABSTRACT

Detection of the existence of a desired user is considered in this paper. We assume that the signal to noise ratio is high enough for us to ignore the effects of noise compared with those of the interference by other users. The inter-user interference and user signals are modeled by the Nakagami model. An observation model for this situation is proposed, the locally optimum test statistic is derived under the model, and the asymptotic performance of the locally optimum detector is compared with that of the envelope detector. We show that the locally optimum detector performs better than the conventional envelope detector.

I. 서론

이동통신의 수요가 늘어나고 주파수 자원은 한정되어 있기 때문에 다중접속기술은 그 중요성이 더욱 커지고 있다. 한정된 주파수 대역에 더 많은 사용자들을 수용할 수 있도록, 많은 다중접속 기술들이 제

시되고 있다. 보기를 들면, 주파수 도약과 직접수열대역확산 통신 시스템들이 그것들이다 [1]. 그러나, 이러한 다중접속 통신 시스템들은 사용자 사이의 간섭 문제를 피할 수 없다. 오늘날 상업통신은 높은 신호대잡음비를 보장하기 때문에 사용자 사이의 간섭이 유일한 교란이라는 가정은 타당하다 [2]. 실제로, 사용자들 사이의 간섭은 잡음보다도 훨씬 더 이동통신 시스템의 성능에 영향을 미친다 [3].

다중접속 통신 시스템에서는 이웃하는 다른 사용자들 때문에 일어나는 간섭이 있을 때 바라는 사용자

*한국과학기술원 전기 및 전자공학과
論文番號: 97106-0324
接受日字: 1997年 3月 24日

의 신호를 검파해야 한다. 특히, 우리는 사용자들 사이의 간섭과 견주었을 때 바라는 사용자 신호가 매우 약한 때를 살펴볼 것이다. 이와 같을 때, 곧 신호대잡음비가 매우 낮을 때, 국소최적 검파 방식이 쓸모 있다는 것은 알려져 있다. 신호대잡음비가 0일 때 국소최적 검파기는 다른 어떤 검파기보다도 검파력 함수의 기울기를 크게 하기 때문에, 신호대잡음비가 낮을 때 가장 좋은 성능을 나타낼을 알 수 있다. 또한 국소최적 검파기는 균일최강 또는 최적검파기와는 달리 늘 얻을 수 있다는 것이 특징이다 [4].

이 논문의 주 목적은 기존의 포락선검파기보다 더 좋은 사용자 신호 검파기를 얻는데 있다. 먼저, 사용자들 사이의 간섭이 있을 때 바라는 사용자를 검파하는데 쓰는 관측모형을 제안했다. 나카가미 m분포는 [5] 사용자신호와 사용자들 사이의 간섭 모두를 모형화하는데 쓰인다. 이 모형은 나카가미 감쇄 (fading) 환경을 가정한다.

II. 관측모형

검파기에서 관측하는 신호의 모형

$$X_i = OS_i + W_i = OS_i + \sum_{j=1}^{m_i} I_{i,j}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

을 고려하자. 여기서, X_i 는 i 째 샘플링한 신호이고 m_i 는 i 째 샘플링할때 사용자 수를 나타내며, n 은 샘플링 횟수이다. 그리고, S_i 는 i 째 샘플링한 신호에서 원하는 사용자의 신호를 나타내고, $I_{i,j}$ 는 i 째 샘플링할때 j 째 이웃 사용자로 말미암은 간섭을 (interference) 나타낸다. 이제 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, $S = (S_1, S_2, \dots, S_n)$, $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ 이라고 놓자.

신호의 비선택적 감쇄는 나카가미 m분포로 잘 나타낼 수 있으므로 S_i 와 $I_{i,j}$ 가 나카가미 확률변수라고 가정한다. 그러나, 나카가미 확률변수 $I_{i,j}$ 의 합인 W_i 의 정확한 분포를 얻는 것은 불가능하다. 간섭 W_i 의 분포를 모르면 국소최적 검파기의 검정통계량을 얻을 수 없다. 따라서,

$$W_i = \sum_{j=1}^{m_i} I_{i,j} \cong I_{i, \max} \quad (2)$$

와 같이 가장 가까운 사용자의 간섭이 우세하다는 가

정을 한다. 여기서, $I_{i, \max}$ 는 가장 큰 간섭을 나타낸다. 이렇게 가정하면 W_i 를 나카가미 확률변수라고 둘 수 있다.

나카가미 m분포의 확률밀도함수는

$$f(x|m, \sigma^2) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\sigma^2}\right)^m x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\sigma^2} x^2\right), x \geq 0 \quad (3)$$

이다. 여기서, $m \geq 1/2$ 은 감쇄 깊이 매개변수이고 σ^2 은 평균 전력 매개변수이며, $m=1$ 인 때 (3)은 레일리 감쇄를 나타낸다.

한편, W_i 와 S_i 가 모두 독립이고 같은 분포를 갖는 확률변수이고, 그 확률밀도함수는 $f_w(x) = f(x|m, \sigma^2)$ 과 $f_s(x) = f(x|m_k, \sigma_k^2)$ 이며, W_i 도 S_i 와 독립이라고 가정한다.

관측모형이 (1)인 검파문제를 가설검정문제로 바꾸면, 귀무가설 H에서 X_i 는 사용자들 사이의 간섭인 W_i 만으로 이루어지고 ($\theta=0$), 대립가설 K에서 X_i 는 바라는 사용자 신호 S_i 와 사용자들 사이의 간섭인 W_i 로 이루어진다 ($\theta > 0$). 곧,

$$H: X_i = W_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

와

$$K: X_i = OS_i + W_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

또는

$$H: \theta = 0 \quad (6)$$

과

$$K: \theta > 0 \quad (7)$$

로 쓸 수 있다 [4].

이제, $X_i, i = 1, 2, \dots, n$ 의 결합확률밀도함수는 H에서는

$$H: \phi(x|H) = \prod_{i=1}^n f_w(x_i) \quad (8)$$

과 같고, K에서는

$$K: \phi(x|K) = \int_{R^n} \prod_{i=1}^n f_w(x_i - \theta s_i) f_s(s_i) ds_i \quad (9)$$

와 같다.

한편, 국소최적 검파기의 비선형성은

$$g(x) = -f'_w(x)/f_w(x) = \frac{2m}{\sigma^2} x - (2m-1) \frac{1}{x} \quad (10)$$

이고, f_w 의 피서정보는

$$I(f_w) = \int g^2(x) f_w(x) dx \quad (11)$$

이다.

Ⅲ. 국소최적 검파기의 검정통계량

일반적으로 균일최강검파기는 얻을 수 없기 때문에, 약한 신호를 검파할 때에는 국소최적 검파기를 생각한다. 일반화된 네이만-피어슨 정리를 따르면, 오경보확률이 같은 모든 검파기들 가운데에서 국소최적 검파기는 원점에서 ($\theta=0$) 검파력 함수 기울기가 가장 크게 된다. 그러므로, 국소최적 검파기의 검파력은 어떤 $\theta_M > 0$ 에 대해 θ 가 구간 $(0, \theta_M)$ 에 있을 때 오경보확률이 같은 다른 모든 검파기들의 검파력보다 크거나 같다 [4].

일반화된 네이만-피어슨 정리로부터, 국소최적 검파기의 검정통계량은

$$\begin{aligned} T_{LO}(X) &= \frac{1}{\phi(X|H)} \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{d}{d\theta} \phi(X|K) \\ &= \frac{1}{\phi(X|H)} \phi(X|H) \sum_{i=1}^n E\{S_i\} g(X_i) \\ &= \sum_{i=1}^n E\{S_i\} g(X_i) \end{aligned} \quad (12)$$

로 쓸 수 있다. 곧,

국소최적 검파기의 통계량은

$$\begin{aligned} T_{LO}(X) &= \sum_{i=1}^n g(X_i) \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{\sigma^2} + (2m-1) \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{X_i}{\sigma^2} - \frac{1}{X_i} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

로 쓸 수 있다.

포락선검파기의 검정통계량이

$$T_{EV}(X) = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{\sigma^2} \quad (14)$$

이므로

$$T_{LO}(X) = 2mT_{EV}(X) + (1-2m) \sum_{i=1}^n \frac{1}{X_i} \quad (15)$$

처럼 쓸 수도 있다.

곧, $T_{LO}(X)$ 는 X_i 와 $1/X_i$ 를 포함하는 부가적인 항을 가지고, $m=1/2$ 일 때는 $T_{LO}(X)=T_{EV}(X)$ 가 된다. $m=1/2$ 은 가장 변동이 심한 감쇄 환경을 뜻한다. $1/X_i$ 을 가진 항이 $m > 1/2$ 일 때 포락선검파기보다 국소최적 검파기의 성능을 더 좋게 함을 알 수 있다. 이 국소최적 검파기의 검정통계량은 m_k, σ_R^2 가 아닌 m, σ^2 에만 의존한다: 따라서, 우리는 국소최적 검파기를 만들 때 사용자들 사이의 간섭에 대한 정보만 알면 되고 바라는 사용자 신호의 통계량은 몰라도 된다. 그림1은 국소최적 비선형성 함수 $g(x)$ 를 보여준다. 국소최적 비선형성 함수는 국소최적 검파기가 관측한 자료를 신호처리하는 형태를 나타낸다. 그림 1에서 국소최적 검파기는 신호대잡음비가 낮은 신호는 증폭하고 높은 신호는 감쇄함을 알 수 있다. 또한, 국소최적 비선형성이 m 이 바뀌면 기울기만 바뀔 뿐 그 모양은 바뀌지 않는 것이 흥미롭다. 곧 관측한 자료를 신호처리하는 방식은 정량적으로 바뀌지 않는다.

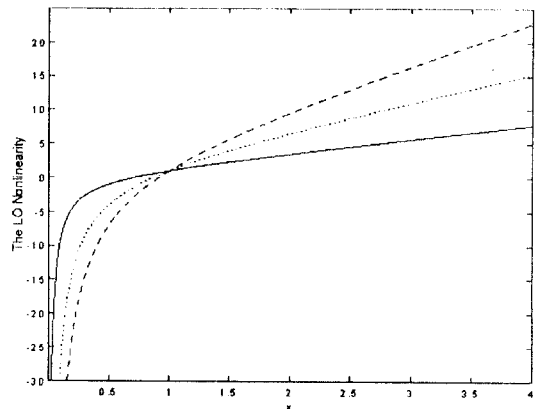


그림 1. $\sigma^2=1, m=1$ (solid), $m=2$ (dotted), $m=3$ (dashed)일 때 국소최적 비선형성

IV. 국소최적 검파기의 접근 성능

검파기들 사이의 접근 성능을 견줄 때 가장 널리 쓰이는 것 가운데 하나는 접근 상대효율이다 [4]. 검정통계량이 T_1 과 T_2 인 두 검파기 D_1 과 D_2 의 접근 상대효율 $ARE_{1,2}$ 는

$$ARE_{1,2} = \frac{\xi_1}{\xi_2} \quad (16)$$

과 같은 비로 나타낼 수 있다. 여기서,

$$\xi_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left[\frac{dE\{T_i|\theta\}}{d\theta} \Big|_{\theta=0} \right]^2}{nV\{T_i|\theta=0\}}, \quad i=1, 2, \quad (17)$$

은 검파기의 효율이다. 우리가 고려할 검파기들은 국소최적 검파기와 포락선검파기이다.

국소최적 검파기의 효율은 [4]에서 보여준 것과 비슷한 과정을 거쳐 얻을 수 있다. 앞에서 본 바와 같이 $m=1/2$ 일 때 $T_{LO}(X) = T_{EV}(X)$ 이기 때문에 $m > 1/2$ 일 때를 주로 생각할 것이다. 그러면,

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{d}{d\theta} E_K\{T_{LO}\} = E_H\{T_{LO}^2\} = nI(f_w) \quad (18)$$

과

$$E_H\{T_{LO}\} = n \int_0^\infty g(x) f_w(x) dx = 0, \quad m > 1/2 \quad (19)$$

라는 것에서 국소최적 검파기의 효율은

$$\begin{aligned} \xi_{LO} &= \frac{E^{2n}\{T_{LO}^2\}}{nV_H\{T_{LO}\}} \\ &= \frac{V_H\{T_{LO}\}}{n} \\ &= I(f_w) \end{aligned} \quad (20)$$

이다. 마찬가지로 방법으로 포락선검파기의 효율을 얻을 수 있다.

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{d}{d\theta} E_K\{T_{EV}\} = E_H\{T_{EV} T_{LO}\} = \frac{n}{\sigma^2} \quad (21)$$

과

$$V_H\{T_{EV}\} = E_H\{T_{EV}^2\} - E_H^2\{T_{EV}\} = \frac{n}{\sigma^4} V_H\{X_i\} \quad (22)$$

라는 것은 쉽게 보일 수 있고, 이로부터 포락선검파기의 효율은

$$\xi_{EV} = \frac{1}{V_H\{X_i\}} \quad (23)$$

이다.

따라서,

$$ARE_{LO, EV} = I(f_w) V_H\{X_i\} \quad (24)$$

이다.

이제 m 의 함수로 $ARE_{LO, EV}$ 를 계산해 보자. $2m+p > 0$ 일 때

$$E_H\{X_i^p\} = \left(\frac{\sigma^2}{m}\right)^{\frac{p}{2}} \frac{\Gamma(m+p/2)}{\Gamma(m)} \quad (25)$$

라는 것으로부터

$$\begin{aligned} I(f_w) &= \int_0^\infty g^2(x) f(x) dx \\ &= \frac{4m^2}{\sigma^4} E_H\{X^2\} - \frac{4m(2m-1)}{\sigma^2} + (2m-1)^2 E_H\left\{\frac{1}{X^2}\right\} \\ &= \frac{4m(1-m)}{\sigma^2} + (2m-1)^2 E_H\left\{\frac{1}{X^2}\right\} \end{aligned} \quad (26)$$

이 됨을 쉽게 보일 수 있다. 한편, $m > 1$ 일 때

$$E_H\left\{\frac{1}{X^2}\right\} = \frac{m}{\sigma^{2(m-1)}} \quad (27)$$

을 얻을 수 있고 그것으로부터 피서정보는

$$I(f_w) = \frac{m(4m-3)}{\sigma^2(m-1)} \quad (28)$$

이다. 그리고, $1/2 < m \leq 1$ 이면, $E_H\{1/X_i^2\}$ 은 무한한 값을 갖는다. 또한 H 아래에서 X_i 의 분산은 다음과 같음을 쉽게 보일 수 있다.

$$V_H\{X\} = \frac{\sigma^2\{m\Gamma^2(m) - \Gamma^2(m+1/2)\}}{m\Gamma^2(m)} \quad (29)$$

식 (24),(28),(29)를 써서

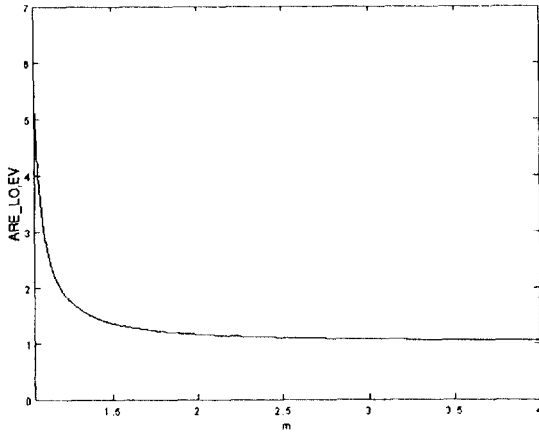


그림 2. $ARE_{LO, EV}$

$$ARE_{LO, EV} = \frac{\{4m-3\} \{m\Gamma^2(m) - \Gamma^2(m+1/2)\}}{(m-1)\Gamma^2(m)}, \quad m > 1, \quad (30)$$

을 얻는다.

그림2에서 $m > 1$ 일 때 $ARE_{LO, EV} > 1$ 임을 알 수 있고, 따라서 국소최적 검파기가 포락선검파기보다 접근 성능이 더 좋다. m 이 커지면 $ARE_{LO, EV}$ 도 커진다는 것을 알 수 있다. $1/2 < m \leq 1$ 이면, ξ_{EV} 는 유한하고 ξ_{LO} 는 무한하므로 $ARE_{LO, EV}$ 가 무한대가 됨을 분명하게 알 수 있다.

T_{LO} 는 $1/X_i$ 를 포함하는 항을 갖고 있기 때문에, T_{LO} 은 어떤 경우에는 음의 큰 값을 가질 수 있다. 이때 T_{LO} 는 제구실을 못하게 할 것이다. 따라서, 이 국소최적 검파기의 변형을 고려하여 음의 동적 범위를 줄일 필요가 있다. 곧, $1/X_i$ 를 $1/X_i^k$, $0 < k < 1$ 로 바꾼 것을 국소준최적 검파기의 검정통계량은

$$T_{LS}(X) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma^2} X_i + (2m-1) \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sigma^2} X_i - \frac{1}{X_i^k} \right\} \quad (31)$$

이 되고, 그 비선형성은

$$g_s(x) = \frac{2m}{\sigma^2} x - (2m-1) \frac{1}{x^k} \quad (32)$$

이며, 그림3과 같다. 여기서 국소준최적 검파기의 비선형성이 국소최적 검파기의 비선형성과 비슷한 모

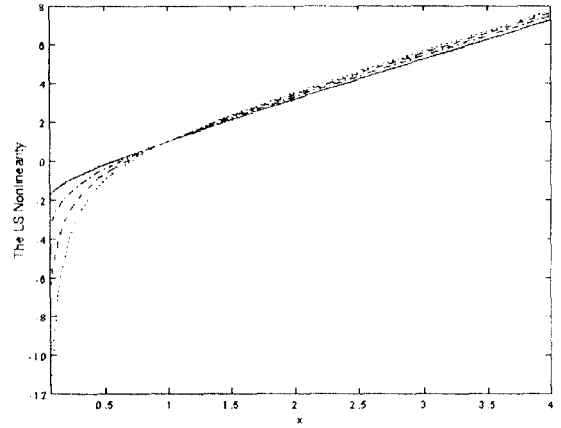


그림 3. $m=1, \sigma^2=1$ 일 때 준최적 비선형성 (solid: $k=0.25$, dashdot: $k=0.5$, dashed: $k=0.75$, dotted: $k=1$)

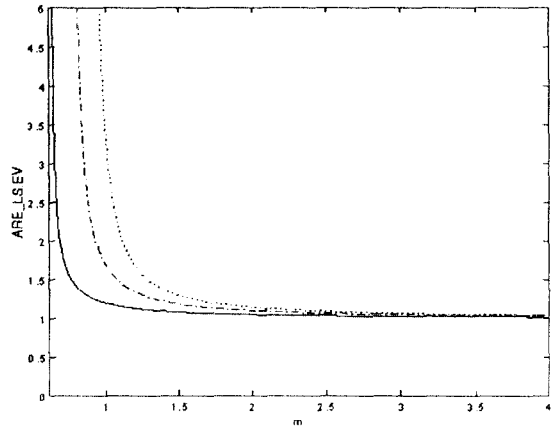


그림 4. $ARE_{LS, EV}$

양을 나타냄을 알 수 있다. 국소준최적 검파기는 $m > (k+1)/2$ 일 때 유한한 효율을 가진다. $k \rightarrow 0$ 일 때 $T_{LS} \rightarrow T_{EV}$ 이고 $k \rightarrow 1$ 일 때 $T_{LS} \rightarrow T_{LO}$ 임을 알 수 있다.

$$V_H\{T_{LS}\} = E_H\{T_{LS}^2\} - E_H^2\{T_{LS}\} \quad (33)$$

과

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{d}{d\theta} E_K\{T_{LS}\} = E_H\{T_{LS}T_{LO}\} \quad (34)$$

를 눈여겨 보면

$$\xi_{LS} = \frac{\{2m\Gamma(m) + km^{(k+1)/2} (2m-1)\Gamma(m - \frac{k+1}{2})\}^2}{A\Gamma(m) - B^2} \quad (35)$$

를 얻는다. 여기서, A와 B는 각각

$$A = \{4m^2\Gamma(m) - 4m \frac{k+1}{2} (2m-1)\Gamma(m + \frac{1-k}{2}) + (2m-1)^2 m^k \Gamma(m-k)\} \quad (36)$$

과

$$B = \{2m \frac{1}{2} \Gamma(m+1/2) - (2m-1)m^{k/2} \Gamma(m-k/2)\} \quad (37)$$

이다.

국소준최적 검파기의 효율의 식 (35)는 표현은 $m > (k+1)/2$ 일 때 유효하다. 그림4는 m에 관한 함수 $ARE_{LS, EV}$ 를 보여준다. 이 그림에서, $ARE_{LS, EV} > 1$ 임을 알 수 있다.

국소최적 검파기와 국소준최적 검파기의 상대 성능을 견주어 보는 것은 흥미롭다. $m > 1$ 일 때, $ARE_{LS, LO}$ 를 얻었고 그 결과를 그림5에 나타냈다. 그림5에서 k가 커지면 $ARE_{LS, LOS}$ 가 커진다는 것을 알 수 있다: 곧, $T_{LS} \rightarrow T_{LO}$ 일 때 $ARE_{LS, LO}$ 는 1에 가까워진다. 또한 m이 작아지면 (곧, 간섭이 더 심해지면) $ARE_{LS, LO}$ 는 0에 가까워진다. 그것은 $m \leq 1$ 일 때 ξ_{LO} 는 무한대이지만 $m > (k+1)/2$ 일 때 ξ_{LS} 는 계속 유한하기 때문이다.

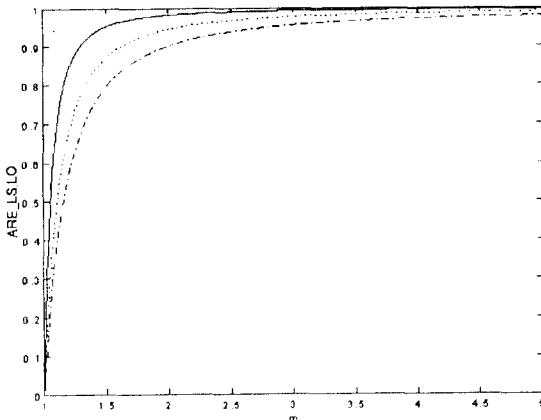


그림 5. $ARE_{LS, LO}$

V. 맺음말

이 논문에서 우리는 사용자 검파 문제에 국소최적 검파 방법을 적용했다. 이것은 보편적인 확률신호검파 문제들 가운데 특별한 경우로 생각할 수 있다. 먼저, 관측모형을 제안했고 국소최적 검파기와 국소준최적 검파기를 유도했으며 기존의 포락선검파기와 견주어서 그것들의 접근 성능 특성을 분석했다. 또한 국소최적 검파기와 국소준최적 검파기 모두 접근적으로 포락선검파기보다 성능이 좋다는 것을 보였다. 감쇄가 아주 심할 때를 빼고는 국소준최적 검파기가 국소최적 검파기와 거의 같은 성능을 나타낸다는 점도 눈여겨 볼 만한 것이다.

참 고 문 헌

1. G. R. Cooper and C. D. Mcgillum, *Modern Communications and Spread Spectrum*, Singapore: McGraw-Hill, 1986.
2. A. H. Wójnar, "Unknown bounds on performance in Nakagami channels," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 34, pp. 22-24, Jan. 1986.
3. Q. T. Zhang, "Outage probability of cellular mobile radio in the presence of multiple Nakagami interferers with arbitrary fading parameters," *IEEE Trans. Vehic. Techn.*, vol. 44, pp. 661-667, Aug. 1995.
4. S. A. Kassam, *Signal Detection in Non-Gaussian Noise*, New York: Springer-Verlag, 1988.
5. M. Nakagami, *The m-distribution-A general formula of intensity distribution of fading, in Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, W.C. Hoffman, ed., Oxford, London: Pergamon, 1960.
6. I. Song and S. A. Kassam, "Locally optimum rank detection of correlated random signals in additive noise," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-38, no. 4, pp. 1311-1322, July 1992, U.S.A.
7. R. S. Blum, "Locally optimum distributed detection of dependent random signals based on ranks," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 42, pp. 931-942, May 1996.

8. J. Bae, S. I. Park, and I. Song, "A known-signal detector based on ranks in weakly dependent noise," *Signal Process.*, vol. 54, pp. 309-314, Nov. 1996.

배진수(Jinsoo Bae) 정회원
 1972년 3월 11일생
 1990년 2월: 경기과학고등학교 조기졸업(우등)
 1993년 2월: 공학사, 한국과학기술원 전기 및 전자공학
 학과(최우등, 3년 조기졸업, 전체차석)
 1995년 2월: 공학석사, 한국과학기술원 전기 및 전자공학
 학과
 1995년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과
 박사과정 재학중
 ※주관심분야: 신호검파, 추계적과정, 신경회로망, 통신이론, 해석학, 대수학

이주식(Jooshik Lee) 정회원
 1974년 7월 30일생
 1996년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공
 학사
 1996년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학
 과 석사과정 재학중
 ※주관심분야: 통계학적 신호처리, 신호검파와 추정, 신경회로망, 이동통신

김석찬(Suk Chan Kim) 정회원
 1971년 4월 5일생
 1993년 2월: 부산대학교 전자공학과 공학사
 1995년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공
 학석사
 1995년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학
 과 박사과정 재학중
 ※주관심분야: 이동통신, 통계학적 신호처리, 이동망

송익호(Lickho Song) 정회원
 1960년 2월 20일생
 1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 공학사(준 최우등)
 1984년 2월: 서울대학교 전자공학과 공학석사
 1985년 8월: 펜실베니아대학교 전기공학과 공학석사
 1987년 5월: 펜실베니아대학교 전기공학과 공학박사
 1987년 3월~1988년 2월: 벨 통신연구소 연구원
 1988년 3월~1991년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전
 자공학과 조교수
 1991년 9월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학
 과 부교수
 1995년 2월~현재: 한국통신학회 논문지 편집위원
 1996년 1월~현재: 한국음향학회 영문논문지 편집위원
 1996년 12월~현재: Visiting Associate Professor at
 McMaster Univ.
 1991년 11월: 한국통신학회 학술상
 1996년 11월: 한국통신학회 학술상
 1993년 11월: 한국음향학회 우수연구상
 ※주관심분야: 검파와 추정, 통계학적 신호처리, 배열
 신호처리, 스펙트럼 분석, 통신이론