

비 정규 분포 잡음 채널에서 높은 신호 대 잡음비를 갖는 무선 센서 네트워크의 정보 융합

Fusion of Decisions in Wireless Sensor Networks under Non-Gaussian Noise Channels at Large SNR

박진태* 김기성** 김기선*
Jintae Park Gi-Sung Kim Kiseon Kim

Abstract

Fusion of decisions in wireless sensor networks having flexibility on energy efficiency is studied in this paper. Two representative distributions, the generalized Gaussian and α -stable probability density functions, are used to model non-Gaussian noise channels. By incorporating noise channels into the parallel fusion model, the optimal fusion rules are represented and suboptimal fusion rules are derived by using a large signal-to-noise ratio(SNR) approximation. For both distributions, the obtained suboptimal fusion rules are same and have equivalent form to the Chair-Varshney fusion rule(CVR). Thus, the CVR does not depend on the behavior of noise distributions that belong to the generalized Gaussian and α -stable probability density functions. The simulation results show the suboptimality of the CVR at large SNRs.

Keywords : Data Fusion(정보 융합), Wireless Sensor Network(무선 센서 네트워크), Non-Gaussian Noise(비정규 잡음)

1. 서론

무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)는 재난 방지, 환경 모니터링, 전장 감시 등의 다양한 응용 분야로 인하여 최근 몇 년간의 주요 연구 주제로 많은 관심을 받아 오고 있다^[1]. 무선 센서 네트워크의

연구 주제들은 대부분 배터리 전력으로 동작하는 센서 노드들로 구성된 네트워크의 에너지 효율성 부분에 초점을 두고 연구 되어 졌다. 그러나 군사 시스템의 플랫폼 기반 정보 융합 응용 분야들에서는 에너지 효율성의 관점 보다 정보 융합 기법의 성능, 잡음 제밍 등이 존재하는 채널 환경에 대한 강인성, 낮은 전송률을 극복하기 위한 효율적인 대역폭의 이용 등의 관점이 주 연구 주제가 된다. 이러한 문제들을 해결하기 위한 방법들 중 하나로 정보 융합을 들 수 있다.

다중 센서를 이용한 정보 융합에 관한 문제는 시스템의 생존성 및 검파 성능의 향상, 요구되는 전송 대역폭 감소, 결정 소요 시간의 감소 등의 이점들로 인

† 2009년 5월 15일 접수~2009년 8월 31일 게재승인

* 광주과학기술원(Gwangju Institute of Science and Technology)

** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 박진태(jtpark@gist.ac.kr)

하여 지난 20여 년간 많은 연구가 진행되었다^[2]. 대표적인 예로 Chair와 Varshney의 논문에서는 전체 시스템 관점에서의 오차 확률을 최소화하기 위하여 개별 센서들로부터 생성된 결정들을 결합하는 최적 정보 융합 구조를 우도비 평가(LR Test : Likelihood Ratio Test)로부터 유도하였다^[3]. 논문의 결과로부터 우도비 평가에 대한 충분한 통계치(Sufficient Statistic)는 검파 확률(Detection Probability)과 허보 확률(False Alarm Probability)의 함수로 주어지는 센서들의 신뢰도에 의하여 가중된 결정들의 가중치 평균으로 주어짐을 보여준다. 이와 비슷한 연구로 상관된 센서 결정들에 관한 최적 정보 융합 기법에 관한 연구가 진행되었으며 센서 결정들이 서로 통계적으로 독립일 경우 Chair-Varshney Rule(CVR)과 동일한 기능을 수행함을 보여준다^[4]. 앞에서 소개된 연구들은 Fig. 1의 병렬 융합 모델에 기반을 두며 센서 노드들과 융합 센터(Fusion Center)간의 채널은 잡음이 없는 채널로 고려되었다.

최근 병렬 융합 모델을 바탕으로 잡음과 페이딩 채널을 고려한 정보 융합에 관한 연구가 Chen의 논문에서 소개되었다^[5]. 페이딩과 정규 잡음(Gaussian Noise) 채널 가정 하에서 최적 우도비 기반 융합 기법의 높은 신호 대 잡음비(SNR : Signal-to-Noise Ratio) 등가 융합 기법으로 2단계 구조를 갖는 CVR이 유도되었다. 모의실험 및 분석 결과 CVR이 정규 잡음 및 Rayleigh 페이딩 하에서 SNR이 일정 수준을 넘는 경우 최적 융합 기법에 준하는 성능을 제공하는 것을 보여준다. 이전의 연구들이 주로 채널 잡음이 정규 분포를 갖는다는 가정 하에서 정보 융합 기법에 관한 연구가 진행되었다. 그러나 많은 연구 결과들로부터 실제 채널 환경이 정규 분포를 갖지 않으며 근사적으로 정규 분포이거나 비정규(Non-Gaussian) 분포를 갖으며 채널 통계치를 추정하는 것이 힘들다고 알려져 있다^[6].

본 논문에서는 다중 센서를 이용한 병렬 융합 구조 모델을 기반으로 군사용 시스템과 같이 전송 전력에 제한이 적어 높은 신호 대 잡음비를 보장할 수 있는 상황에서 최적 융합 기법에 준하는 성능을 제공함과 동시에 비정규 잡음 분포를 갖는 채널 환경에서 강한 검파 성능을 제공할 수 있는 융합 기법을 제공하고자 한다. 이를 위하여 Chen의 논문에서 사용된 높은 신호 대 잡음비 근사 기법을 사용하여 Exponentially-tailed 분포와 Algebraic-tailed 분포의 두 가지 대표적인 잡음 분포의 범주(Class)에 대한 최적 융합 기법의 특성을 분석한다.

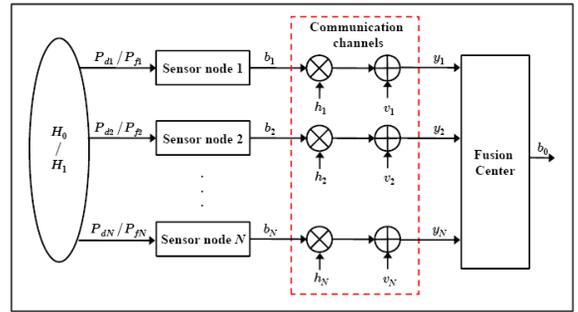


Fig. 1. 병렬 융합 모델

2. 정보융합 모델 및 최적 융합 기법

Fig. 1은 전형적인 병렬 정보 융합 모델을 보여준다. 이 모델은 N 개의 센서 노드들로 구성되어 있으며 각각의 센서 노드들은 물리적인 현상을 관찰하여 두 가지 가설 H_0 (표적 부재) 및 H_1 (표적 존재)에 대한 결정 $b_n \in \{+1, -1\}$ 을 생성한다. 결정 b_n 에 대한 센서 노드의 검파 및 허보 확률은 $P_{dn} = P[b_n = 1|H_1]$ 및 $P_{fn} = P[b_n = -1|H_1]$ 으로 표현된다. 생성된 결정들은 통신 채널을 통해서 융합 센터로 전송되며 n 번째 센서 노드로부터 수신된 결정 y_n 은 다음과 같이 표현된다.

$$y_n = h_n b_n + v_n$$

여기서 h_n 은 페이딩 채널에 의한 감쇄이며 $h_n > 0$ 이고 v_n 은 가산 채널 잡음이며 확률 밀도 함수 $f(x)$ 을 갖으며 영을 중심으로 좌우가 대칭이다. 결정들을 수신한 후 융합 센터는 융합 기법에 따라 최종 결정 $b_0 \in \{+1, -1\}$ 을 생성한다.

Fig. 1의 병렬 융합 모델로부터 본 논문에서는 정보 융합 기법을 다음의 형태로 구현한다고 제안한다.

$$\Lambda_{FS} = \Lambda_{FS}(\bar{y}) \begin{matrix} b_0 = +1 \\ > \\ < \\ b_0 = -1 \end{matrix} \lambda_{TH}$$

여기서 $\bar{y} = [y_1, \dots, y_N]^T$ 는 N 센서 노드들로부터 수신된 결정들의 벡터이다. Λ_{FS} 은 융합 통계치(Fusion Statistic)이며 λ_{TH} 는 Neyman-Pearson 기준에서 시스템

레벨에서 요구되는 허보 확률을 만족 하도록 선택된 경계 값(Threshold Value)이다. 따라서 A_{FS} 을 경계 값 λ_{TH} 와 비교하여 융합 센터는 b_0 가 +1 또는 -1인지를 판별하게 되며 각각에 대응되는 가설은 각각 $H_1 : b_0 = +1$ 그리고 $H_0 : b_0 = -1$ 이 된다.

Chair의 논문에서 병렬 융합 모델에서 채널 잡음을 고려하지 않는 경우에 대한 융합 기법으로 우도비 융합 기법에 대하여 CVR이 증가임을 보였다. 즉, 채널 잡음을 고려하지 않은 경우 즉 $f(x) = \delta(x)$ 일 때 CVR이 최적 융합 기법이 되며 다음과 같은 융합 통계치로 표현될 수 있다.

$$A_{CVR} = \sum_{\{n: y_n > 0\}} \log \frac{P_{dn}}{P_{fn}} + \sum_{\{n: y_n < 0\}} \log \frac{1 - P_{dn}}{1 - P_{fn}}$$

위의 결과는 잘 알려진 Chair-Varshney fusion statistic이며 최적 가중치는 센서 노드들의 허보 및 검파 확률의 함수로 주어진다.

병렬 융합 모델에서 잡음 채널이 포함된 경우 확률 밀도 함수 $f(x)$ 를 갖는 잡음에 대한 최적 융합 통계치는 우도비에 의해서 주어지며 융합 센터에서의 관측치들이 조건적으로 독립이라고 가정함으로써 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A_{LR} = \frac{L(\bar{y}|H_1)}{L(\bar{y}|H_0)} = \prod_{n=1}^N \frac{P_{dn}f(y_n - h_n) + (1 - P_{dn})f(y_n + h_n)}{P_{fn}f(y_n - h_n) + (1 - P_{fn})f(y_n + h_n)}$$

A_{LR} 을 이용한 융합 기법의 경우 최적 융합 기법이나 A_{LR} 의 경우 채널 잡음의 확률 밀도 함수에 따라서 다른 형태를 갖으며 최적 성능을 제공하기 위해서는 채널에 대한 정보를 명확하게 알고 있거나 채널의 통계치를 정확하게 추정할 수 있어야 한다.

3. 채널 잡음 모델

정규 분포는 무선 통신 채널 및 실생활의 다양한 통계현상을 모델링 하기위하여 널리 사용된다. 그러나 정규 분포의 유용성 및 수학적 편리성에도 불구하고 많은 실제 환경들 예를 들면 수중 음파 통신, 레이더

클러터(Clutter), 대기, 차량의 이그니션(Ignition) 잡음 등의 impulsive 특성을 묘사하기에는 어려움이 있다. Impulsive 특성을 갖는 비 정규 분포 잡음 환경에서의 SNR이 높은 경우 채널에 의한 오류들은 주로 outlier로 불리는 분포함수의 중심 값에서 멀리 떨어진 곳에 존재하는 값들로부터 발생하게 된다. 다음은 이러한 분포들의 대표적인 두 가지 범주로 Exponentially-tailed 분포와 Algebraic-tailed 분포에 대한 소개 및 이들 범주에 속하는 확률 분포 함수의 예를 보여준다.

가. Generalized Gaussian 분포

일반화된 정규 분포(Generalized Gaussian Distribution)는 지수함수로 감소하는 꼬리 특성을 가지고 있으며 다음과 같은 수식으로 표현된다^[7].

$$f_p(x) = \frac{p}{2\sigma\Gamma(1/p)} e^{-|x/\sigma|^p}$$

여기서 $\sigma > 0$ 은 스케일 파라미터이며 $p \geq 1$ 은 분포의 impulsiveness와 관련된 꼬리 행동 특성을 보여준다. 여기서 Γ 는 감마 함수이다. 일반화된 정규분포의 확률밀도함수가 $p=2$ 일 때 정규 분포, $p=1$ 일 때 라플라스(Laplace) 분포에 해당하며 극한의 경우인 $p \rightarrow \infty$ 의 경우 $f_p(x)$ 가 균일(Uniform) 분포로 수렴함을 볼 수 있다. 수학적 편리성 때문에 일반화된 정규 분포 모델은 전자기 무선 잡음을 묘사하는데 널리 사용되고 있다^[6].

나. α -stable 분포

α -stable 분포의 확률밀도함수는 다음과 같은 특성함수로 주어진다^[8].

$$f_\alpha(x; \delta, \gamma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\delta\omega - \gamma|\omega|^\alpha) e^{-i\omega x} d\omega$$

여기서 γ 는 분포도(dispersion)를 나타내며 δ 는 위치 파라미터이다. α -stable 분포에 속하는 두 가지 잘 알려진 확률분포들로는 $\alpha=2$ 일 때 분산 2γ 을 갖는 정규분포와 $\alpha=1$ 일 때 분포도 γ 을 갖는 코시(Cauchy) 분포가 있다. α 의 다른 값에 대해서는 일반적인 형태의 알려진 분포가 존재하지 않으며 다음과 같은 급수 형태의 표현이 알려져 있다. x 가 큰 경우 즉, $|x| \rightarrow \infty$, 일 때 점근 급수 형태는 다음과 같이 주어진다.

$$f_\alpha(x) = \sum_{k=1}^K a_k \gamma^k |x|^{-k\alpha-1} + O(|x|^{-\alpha(K+1)-1})$$

여기서 $a_k = \frac{1}{\pi} \frac{(-1)^{k-1}}{k!} \Gamma(k\alpha+1) \sin(\frac{\pi k\alpha}{2})$ 이다.

x 가 작은 경우 즉, $|x| \rightarrow 0$ 일 때 점근 급수 형태는 다음과 같다.

$$f_\alpha(x) = \sum_{k=0}^K b_k \gamma^{-\alpha} x^{2k} + O(|x|^{2K+1})$$

여기서 $b_k = \frac{1}{\pi\alpha} \frac{(-1)^k}{(2k)!} \Gamma(\frac{2k+1}{\alpha})$ 이다. 이 분포 함수는 무선 통신 시스템에서 잡음 및 간섭의 모델링에서 중요한 역할을 하고 있다.

4. 높은 신호 대 잡음비 부 최적 융합 기법

이전 장에서 CVR 융합 기법 채널 잡음이 없는 경우에서 최적 융합 기법이 됨을 소개하였다. 이로부터 채널 잡음이 존재하며 잡음의 확률 분포를 모르는 경우에도 CVR 융합 기법이 될 수 있는 조건으로 어떤 것이 있는지에 대한 의문이 생기게 된다. 이러한 의문에 대한 가능성 있는 해답으로 Chen의 논문에서 소개된 한 가지 결과를 들 수 있다. 이 결과에서는 Rayleigh 페이딩과 정규 잡음이 존재하는 채널 환경에서 CVR이 최적 우도비 기반 융합 기법에 대한 높은 신호 대 잡음비 점근 방법에 대한 대안으로 유도됨을 볼 수 있다. 따라서 본 장에서는 동일한 높은 신호 대 잡음비 점근 방법을 앞의 장에서 소개된 잡음 분포 함수들에 대한 우도비 융합 통계치에 적용하여 유사한 특성이 나타나는지 분석한다.

가. Generalized Gaussian 잡음에 대한 부 최적 융합 기법

일반화된 정규 분포에 대한 최적 우도비 기반 융합 통계치는 다음과 같이 주어진다.

$$A_{GG}(\bar{y}) = \prod_{n=1}^N \frac{P_{dn} + (1 - P_{dn}) \exp[A_G(y_n, h_n)]}{P_{fn} + (1 - P_{fn}) \exp[A_G(y_n, h_n)]}$$

$A_G(y_n, h_n) = (-|y_n + h_n|^p + |y_n - h_n|^p) / \sigma^p$ 이다. 신호

대 잡음비가 높은 경우 즉, $\sigma \rightarrow 0$ 일 때 $\lim_{\sigma \rightarrow 0} A(y_n, h_n)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{cases} +\infty & \text{when } \{-|y_n - h_n|^p + |y_n + h_n|^p\} > 0 \\ -\infty & \text{when } \{-|y_n - h_n|^p + |y_n + h_n|^p\} < 0 \end{cases}$$

이로부터 Chen의 논문에서의 경우와 유사하게 다음과 같이 $S^+ = \{n : y_n \geq 0\}$, $S^- = \{n : y_n < 0\}$ 을 정의하고 각각의 경우에 대하여 지수가 포함된 항이 높은 신호 대 잡음 비 근사에 의하여 1이 되며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} A_{GG} = \prod_{n \in S^+} \frac{P_{dn}}{P_{fn}} \prod_{n \in S^-} \frac{1 - P_{dn}}{1 - P_{fn}}$$

위의 결과의 양변에 로그를 취하면 일반화된 정규 분포에서도 Chair의 결과에서와 같이 CVR과 동일한 통계적 특성을 갖는 융합 통계치를 얻을 수 있다. 이로부터 CVR이 Exponentially-tailed 분포의 범주에 속하는 분포 함수들에 대해서 명확한 형태에 상관없이 최적 우도비 융합 기법에 대한 높은 신호 대 잡음비에 대한 대안으로 제공될 수 있음을 알 수 있다.

나. α -stable 잡음에 대한 부 최적 융합 기법

Algebraic-tailed 분포 범주에 대해서 α -stable 분포 함수를 소개 하였다. α -stable 분포 함수의 경우 α 가 작을수록 impulsive 특성이 강하게 작용하며 $\alpha = 2$ 인 경우인 정규 분포에 대해서는 일반화된 정규 분포에서와 같이 정규 분포에 해당함을 알 수 있다. 따라서 이장에서는 $0 < \alpha < 1$ 에 대한 최적 우도비 융합 통계치를 제일 먼저 고려한다. 이 경우에 대한 최적 우도비 융합 통계치는 다음과 같다.

$$A_\alpha(\bar{y}) = \prod_{n=1}^N \frac{P_{dn} A_k^- + (1 - P_{dn}) A_k^+}{P_{fn} A_k^- + (1 - P_{fn}) A_k^+}$$

여기서 $A_k^- = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \gamma^k |y_n - h_n|^{-k\alpha-1}$ 이며 $A_k^+ = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \gamma^k |y_n + h_n|^{-k\alpha-1}$ 이다. 일반화된 정규 분포 함수의 경우와 유사하게 우도비 통계치를 S^- 와 S^+ 의 두

부분으로 나뉘서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\log A_\alpha = \sum_{n \in S^+} \log \frac{P_{dn} \left(1 - \frac{A_k^+}{A_k^-} \left(1 - \frac{1}{P_{dn}} \right) \right)}{P_{fn} \left(1 - \frac{A_k^+}{A_k^-} \left(1 - \frac{1}{P_{fn}} \right) \right)}$$

$$+ \sum_{n \in S^-} \log \frac{1 - P_{dn} \left(1 - \frac{A_k^-}{A_k^+} \right)}{1 - P_{fn} \left(1 - \frac{A_k^-}{A_k^+} \right)}$$

α -stable 분포는 $\alpha < 2$ 일 때 분산이 존재하지 않기 때문에 일반적으로 사용되는 이차 모수(Second Moment)를 이용하여 SNR을 정의하는 방법을 사용할 수 없다. 따라서 높은 신호 대 잡음비 접근 방법을 사용하기 위해서 다음과 같이 정의되는 GSNR(Geometric SNR)을 이용한다^[7].

$$GSNR = 2C_g \left(\frac{A}{S_0} \right)^2$$

여기서 S_0 는 geometric power 이며 표현식은 다음과 같다. $S_0 = S_0(X) = e^{E \log |X|}$ 이며 여기서 X 는 랜덤 변수이다. α -stable 분포에 대한 geometric power는 $\gamma C_g^{1/\alpha-1}$ 이다. 따라서 $A=1$ 일 때 GSNR은 $2C_g^{3-2/\alpha}/\gamma^2$ 로 주어진다. 이로부터 높은 신호 대 잡음비 접근 방법 즉, $\gamma \rightarrow 0$ 을 이용하여 다음과 같은 근사된 융합 통계치를 구할 수 있다

$$\lim_{\gamma \rightarrow 0} \log A_\alpha$$

$$= \sum_{n \in S^+} \log \frac{P_{dn} \left(1 - \frac{|y_n - h_n|^{\alpha+1}}{|y_n + h_n|^{\alpha+1}} \left(1 - \frac{1}{P_{dn}} \right) \right)}{P_{fn} \left(1 - \frac{|y_n - h_n|^{\alpha+1}}{|y_n + h_n|^{\alpha+1}} \left(1 - \frac{1}{P_{fn}} \right) \right)}$$

$$+ \sum_{n \in S^-} \log \frac{1 - P_{dn} \left(1 - \frac{|y_n + h_n|^{\alpha+1}}{|y_n - h_n|^{\alpha+1}} \right)}{1 - P_{fn} \left(1 - \frac{|y_n + h_n|^{\alpha+1}}{|y_n - h_n|^{\alpha+1}} \right)}$$

또한 $f_\alpha(x; \delta, \gamma)$ 로부터 $\gamma \rightarrow 0$ 일 때 $f_\alpha(x) \rightarrow \delta(x)$ 가 됨

을 알 수 있다. 즉, $n \in S^+$ 의 경우 $|y_n - h_n|^{\alpha+1}$ 은 α 값에 상관없이 $\gamma \rightarrow 0$ 일 때 0으로 접근함을 알 수 있다. $n \in S^-$ 의 경우도 유사하게 $|y_n + h_n|^{\alpha+1}$ 이 α 값에 상관없이 $\gamma \rightarrow 0$ 일 때 0으로 접근함을 알 수 있다. 따라서 위의 결과는 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\log A_{\alpha, \gamma \rightarrow 0} = \sum_{n \in S^+} \log \frac{P_{dn}}{P_{fn}} + \sum_{n \in S^-} \log \frac{1 - P_{dn}}{1 - P_{fn}}$$

이로부터 α -stable 분포 함수에서 $0 < \alpha < 1$ 일 때 융합 통계치가 CVR이 됨을 알 수 있다. 또한 $\alpha = 1$ 인 코시 분포의 경우도 위의 결과와 동일한 특성을 가짐을 알 수 있다. 따라서 α -stable 분포 함수에서도 높은 신호 대 잡음비 근사에 의하여 CVR 통계치가 부 최적화 융합 통계치가 됨을 볼 수 있다.

5. 성능 평가

이번 장에서는 Neyman-Pearson 기준에 의거하여 최적 우도비 기반 융합 기법과 CVR 융합 기법의 검파 성능을 모의실험을 통하여 평가한다. 이장에서는 임의의 분포 함수에 대한 CVR의 부 최적화(Sub-optimality)를 확인하기 위하여 정규 분포, 라플라스 분포, 코시 분포 및 $\alpha = 0.5$ 일 때의 α -stable 분포의 4가지에 예에 대한 성능 분석을 시행한다. 또한 CVR 융합 기법의 강인성(Robustness)을 확인하기 위하여 ϵ -contaminated 잡음 분포를 소개 하고 이에 대한 성능을 분석한다.

가. 부 최적 성능 평가

CVR 융합 기법의 부-최적화를 평가하기 위해서 일반화된 정규 분포의 예로 정규 분포 및 라플라스 분포와 α -stable 분포의 예로 분포 및 $\alpha = 0.5$ 의 경우를 고려한다. 성능 평가를 위해 먼저 채널의 페이딩을 단위 전력($E[h_n^2] = 1$)을 갖는 Rayleigh 분포라고 가정한다. 개별 센서 노드들의 검파 및 허보 확률은 센서들 간에 동일하며 각각 $P_d = 0.5$ 및 $P_f = 0.05$ 로 가정한다.

Fig. 2는 정규 잡음 하에서 총 8개의 센서 노드를 이용하는 경우 시스템 수준에서의 허보 확률이 $P_{f0} = 0.01$ 일 때 SNR 값에 대한 시스템 수준의 검파 확률의 결과를 보여준다. 모의실험의 결과로부터 CVR 융합 기법이 SNR이 약 15dB 이상이 될 때 우도비(LR) 기

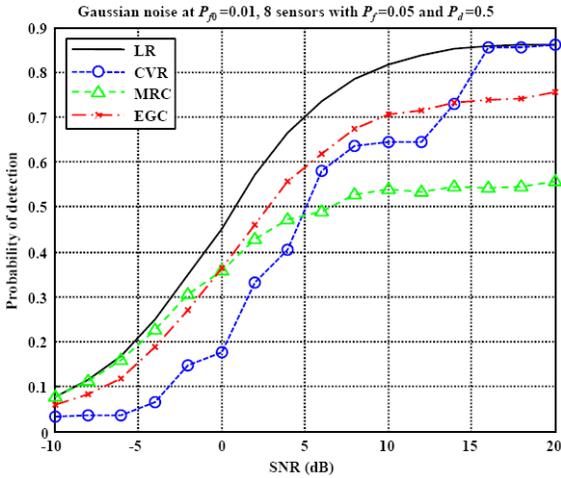


Fig. 2. 정규 잡음 채널에서 SNR에 대한 검파 확률

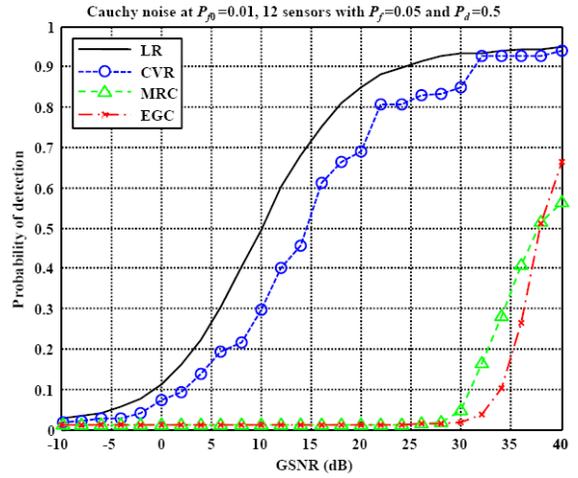


Fig. 4. 코시 잡음 채널에서 GSNR에 대한 검파 확률

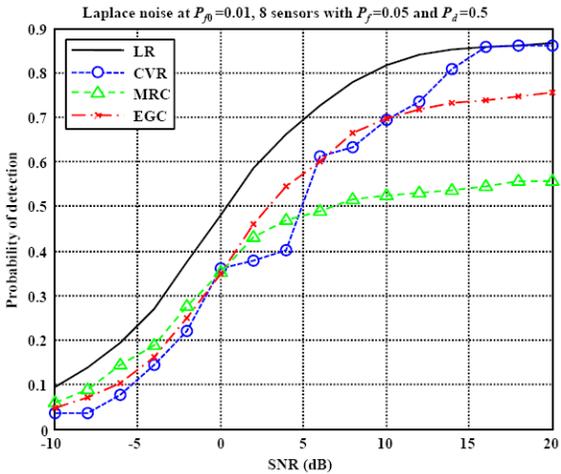


Fig. 3. 라플라스 잡음 채널에서 SNR에 대한 검파 확률

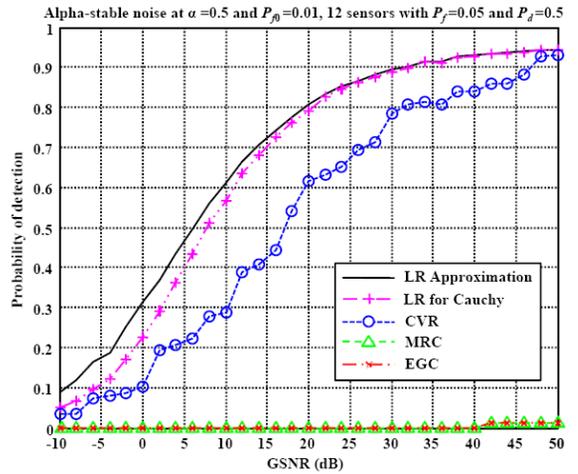


Fig. 5. α -stable 잡음($\alpha=0.5$) 채널에서 GSNR에 대한 검파 확률

반 융합 기법에 근접하는 성능을 보여주고 있다. Chen의 논문에서 소개된 다른 융합 기법들인 MRC와 EGC 융합 기법의 경우 SNR이 높ی 짐에 따라서 성능의 향상이 관찰되나 최적 융합 기법에 근접하지는 못하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3은 라플라스 잡음 분포 하에서 정규 분포의 예와 다른 조건이 동일한 경우에 대하여 SNR에 대한 시스템 수준의 검파 확률을 보여준다. 이 경우도 신호 대 잡음비가 높은 경우 정규 분포의 경우와 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 정규 분포의 경우와 다른 점은 신호 대 잡음비가 낮은 경우 MRC와 EGC의 성능 감소가 CVR보다 크다는 점이다.

코시 잡음 분포에 대한 모의실험 결과가 Fig. 4에 나타나 있으며 이 경우에는 앞의 두 예와 달리 전체 융합의 성능을 높이기 위해서 총 12개의 센서 노드를 이용하였으며 이외 다른 조건은 앞의 예들과 동일하게 주어졌다. Fig. 4의 결과에서 CVR이 약 30dB 이상에서부터 LR 융합 기법에 근접하는 성능을 제공함을 볼 수 있다. 비록 이전 예에서와 달리 최적 융합 기법에 준하는 성능을 제공하기위해 높은 GSNR값이 요구되나 여전히 앞의 예들과 같은 행동 특성을 보여주고 있다.

Fig. 5는 $\alpha=0.5$ 일 때 α -stable 분포 하에서의 검파

성능을 보여준다. 모의실험 조건은 코시 잡음의 경우와 동일하다. α -stable 분포가 급수 형태로 주어지기 때문에 최적 융합 기법 대신 $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} \log A_\alpha$ 을 이용한 융합 기법과 코시 잡음에 대한 LR 융합 기법이 사용되었다. 이 경우도 이전 결과와 유사함을 알 수 있다.

나. 강인성 평가

부 최적화 평가에서는 4가지의 특별한 잡음 분포 모델에 대해서 CVR 융합 기법의 성능을 평가하였다. 융합 기법의 강인성을 평가하기 위하여 Huber^[9]에 의해서 소개된 다음과 같은 형태를 갖는 ϵ -contaminated 분포를 고려한다.

$$f_H(x) = (1-\epsilon)N(x;0,\sigma) + \epsilon H(x;0,\gamma)$$

여기서 ϵ 은 contamination 파라미터이며, $N(x;0,\sigma)$ 는 평균이 0이며 분산이 σ^2 인 정규 분포이며 $H(x;0,\gamma)$ 는 중심이 0이며 좌우가 대칭인 산포도 γ 를 갖는 임의의 분포이다. 이 장에서는 다음과 같은 contaminated 코시 분포를 사용한다.

$$f_{CC}(x) = (1-\epsilon) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/2\sigma^2} + \epsilon \frac{\gamma^2}{\pi(x^2 + \gamma^2)}$$

모의실험을 위하여 코시 잡음에 의한 10%의 contamination($\epsilon=0.1$)이 존재하며 $\gamma=1$ 이고 센서 노드 수준의 검파 및 허보 확률은 각각 $P_d=0.5$ 및 $P_f=0.05$ 로 가정한다. 전체 센서 노드의 수는 $N=8$ 로 가정한다. CVR 융합 기법의 성능이 점프하는 특성을 가지고 있기 때문에 CVR 융합 기법에 대한 시스템 수준에서의 검파 확률을 시스템 수준의 허보 확률 값의 다음 범위인 $P_{f0}=0.01 \sim 0.03$ 사이에서 최댓값을 선택한다. 다른 융합 기법들에 대한 검파 확률은 시스템 수준의 허보 확률이 $P_{f0}=0.03$ 일 때의 값으로 선정한다.

Fig. 6은 contaminated 코시 잡음에서 SNR에 대한 시스템 수준의 검파 확률을 보여준다. 이 예에서 최적 LR은 정규 잡음 분포에 대한 최적 우도비 통계치를 사용하고 있다. 우도비 기반 융합 기법의 경우 약 14dB까지 SNR에 따라 성능이 증가하다가 이후 성능의 감소가 발생함을 보여준다. 이는 SNR이 높아짐에 따라서 정규 잡음 분포에 대한 우도비 기반 통계치의 오차가 점점 커지게 되어 오히려 성능의 감소를 유발

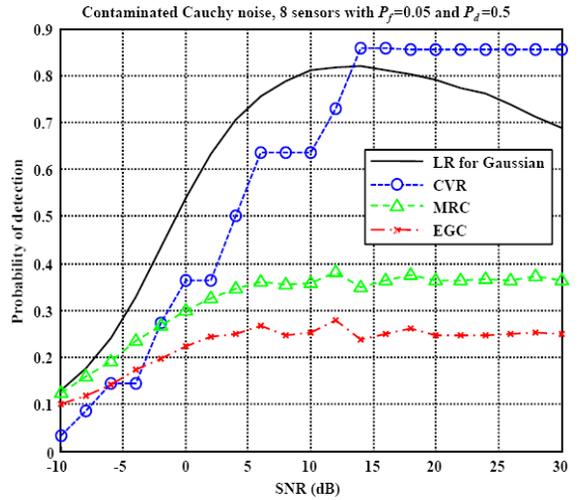


Fig. 6. 코시 contaminated 정규 잡음 채널에서 SNR에 대한 검파 확률

하고 있는 것으로 판단된다. CVR 융합 기법의 경우 SNR에 따라 성능이 증가하며 약 14dB 부터는 우도비 기반 융합 기법 보다 높은 검파 성능을 보인다.

6. 결론

군사 시스템과 같은 플랫폼 단위로 구성되는 무선 센서네트워크의 특별한 응용분야에서 에너지 효율성의 측면에서 제약이 작은 시스템들의 정보융합에 관한 연구를 수행하였다. 수중 음파 통신, 레이더 클러터, 대기, 차량의 이그니션 잡음 등의 임펄스 특성을 묘사하기 위해 일반화된 정규 분포와 α -stable 분포를 채널 잡음 모델로 사용하였다. 병렬 융합 구조 모델로부터 일반화된 정규분포 및 α -stable 분포에 대한 최적 우도비 기반 융합 기법을 제시 하였으며, 높은 신호 대 잡음비 근사의 결과 두 가지 분포 모두에 대해서 기존에 알려진 Chair-Varshney 융합 기법과 동일한 통계치를 얻을 수 있었다. 모의실험 결과들로부터 CVR이 신호 대 잡음비가 어느 수준을 넘는 경우 최적 융합 기법에 준하는 성능을 제공함을 확인하였다. ϵ -contaminated 분포를 이용하여 CVR이 강인한 성능을 제공함을 확인하였다.

본 연구 결과로부터 다중 센서를 이용하는 플랫폼 단위의 군사 시스템에서 CVR을 이용 센서 정보를 융합하는 경우 채널의 SNR이 어느 수준 이상이 되면

잡음의 영향에 관계없이 최적 성능에 준하는 검파확률을 제공할 수 있을 것으로 예상 된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구과제사업(ADD080601)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] I. F. Akyildiz, Weilian Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks", IEEE Commun. Mag., Vol. 40, pp. 102~114, Aug. 2002.
- [2] R. Viswanathan, and P. K. Varshney, "Distributed Detection with Multiple Sensors : Part I-Fundamentals", Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 1, pp. 54~63, Jan. 1997.
- [3] Z. Chair and P. K. Varshney, "Optimal Data Fusion in Multiple Sensor Detection Systems", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-22, No. 1, pp. 98~101, Jan. 1986.
- [4] S. C. A. Thomopoulos, R. Viswanathan, and D. C. Bougoulas, "Optimal Decision Fusion in Multiple Sensor Systems", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-23, No. 5, pp. 644~653, Sept. 1987.
- [5] B. Chen, R. Jiang, T. Kasetkasem, and P. K. Varshney, "Channel Aware Decision Fusion in Wireless Sensor Networks", IEEE Trans. Signal Process., Vol. 52, No. 12, pp. 3454~3458, Dec. 2004.
- [6] S. A. Kassam, Signal Detection in Non-Gaussian Noise}. Springer-Verlag, 1988.
- [7] J. G. Gonzalez, "Robust Techniques for Wireless Communications in Non-Gaussian Environments", Ph.D. Dissertation, Dept. Electr. Eng., Univ. Delaware, Newark, 1997.
- [8] A. Tsihrintzis and C. L. Nikias "Performance of Optimum and Suboptimum Receivers in the Presence of Impulsive Noise Modeled as an Alpha-Stable Process", IEEE Trans. Commun., Vol. 43, No. 3, pp. 904~914, Mar. 1995.
- [9] P. J. Huber, Robust Statistics. New York : Wiley, 1981.