

저속 초광대역 방식의 무선 측위에 알맞은 신호 도착 방향 추정 기법 두 가지

종신회원 이 용 업*, 준회원 임 경 순*, 박 주 현*

Two Techniques of Angle-of-Arrival Estimation for Low-Data-Rate UWB Wireless Positioning

Yong Up LEE* *Lifelong Member*, Kyeong Sun Lim*, Joohyeon Park* *Associate Members*

요 약

IEEE802.15.4a 표준 채널 환경에 적합한 신호모형과 평균가중 도착각 추정기법을 제안하여 저속 초광대역 방식에 근거한 무선측위 시스템에 사용되는 신호 클러스터의 도착각 매개변수를 추정하고, 종래 추정방식들과 비교해 추정성능이 우수한 두 가지 방식을 제안한다. 클러스터 수가 많은 채널 환경에서는 평균 주사벡터기반의 도착각 추정방식이, 클러스터 수가 작은 채널에서는 평균가중 주사벡터 방식의 도착각 추정이 더 정확함을 컴퓨터 모의실험을 통해 보인다. 또한, 신호대 잡음비를 변화시켜도 항상 제안 방식의 성능이 우수함을 알 수 있으며, 제안 방식은 신호대 잡음비가 증가함에 따라 추정오차가 감소함도 알 수 있다.

Key Words : low-data-rate UWB(LR-UWB), IEEE 802.15.4a channel, clustering, Angle-of-arrival(AOA), Estimation technique, Wireless positioning.

ABSTRACT

The signal model and weighted-average based estimation techniques are proposed to estimate the angle-of-arrival (AOA) parameters of multiple clusters for a low data rate ultrawide band (LR-UWB) based wireless positioning system. It is observed that the weighted-average based AOA estimation technique gives an optimal AOA estimate under few clusters condition, and the average based AOA estimation technique gives a correct AOA estimate under many clusters condition through computer simulation. Also, we can observe that the variance estimation error decreases as SNR increases, and the proposed techniques are superior to the conventional technique from the viewpoint of performance.

I. 서 론

저속 초광대역 방식 기반의 무선측위는 둘 이상의 송신기에서 전송된 초광대역 신호들을 수신기의 배열 안테나로 수신신호들의 도착방향인 도착각 매개변수들을 추정하고 이들을 융합하여 목표위치를

결정 하는 과정이다^{1,2)}. 저속 초광대역 연구³⁾에 따르면, IEEE802.15.4a 채널을 통과해 수신된 초광대역 신호는 감쇄효과이외에 그림 1과 같은 수신 방향의 클러스터링 효과를 경험하는데, 이로 말미암아, 정확한 도착각 추정치 결정이 어려우며, 대부분의 종래 도착각 추정기법^{4,5)}들은 잘못된 추정치를 얻는

* 이 논문은 2011년도 한림대학교 교비연구비(HRF-201109-057)

* 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2011-0026886).

* 한림대학교 전자공학과(yulee@hallym.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-06-237, 접수일자 : 2011년 6월 2일, 최종논문접수일자 : 2012년 3월 19일

다. 클러스터 효과는 도착각 매개변수의 불규칙 확률 특성, 첫번째 클러스터와 다른 클러스터들과의 중심각 불일치 등의 추정에 심각한 방해를 만들어 낸다.

이전연구⁶⁾에서는 이 가운데에서 도착각매개변수의 확률특성을 고려한 평균주사 벡터 기반의 도착각 추정기법을 제안해, 실내 채널에서 수신신호의 클러스터링 효과에 의한 도착각 추정 어려움을 완화하였다. 그런데, 그림 1과 같이 도착각 매개변수가 확률특성뿐만 아니라 수신된 클러스터들의 중심 또는 다중경로 신호들의 도착방향의 평균이 첫 번째 클러스터 중심과 다른 때, 곧 $\theta_{i1} \neq \theta_{ij}, j = 2, \dots, N$ 일 때, 평균주사 벡터 기반의 도착각 추정기법도 정확하게 도착각을 추정할 수가 없고 추정오차가 발생된다.

이 논문에서는 도착각 매개변수 확률특성과 IEEE 802.15.4a 채널의 수신신호 클러스터링 효과를 고려한 신호모형과 평균가중 주사벡터 기반의 도착각 매개변수 추정기법을 제안하여, 저속 초광대역 방식 기반의 무선측위에 필요한 도착각 추정치를 정확하게 얻고, 종래 부공간 기반의 도착각 추정 방식, 평균주사 벡터 기반의 추정 방식과 제안 방식을 비교해 성능이 우수함을 보인다.

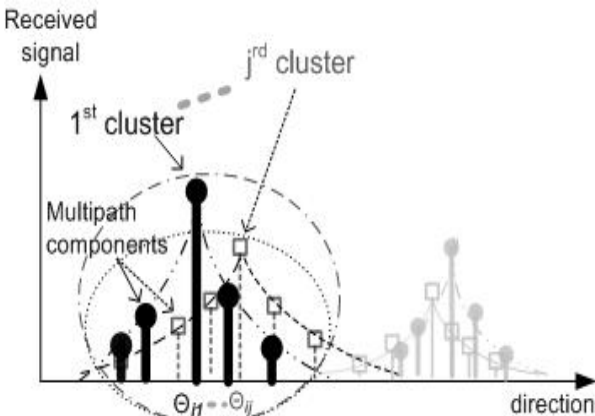


그림 1. 신호 도착 방향의 클러스터 효과가 있을 때 신호 도착방향 추정의 어려움을 나타낸 예.
Fig. 1. Example of cluster effect.

II. IEEE 802.15.4a 채널에 적합한 신호 모형

그림 2의 저속 초광대역 기반 무선측위 환경에서 송신기로부터 IEEE 802.15.4a 채널을 거쳐 미지마 디인 수신기의 배열 안테나에서 받은 신호의 도착 방향들은 고정된 값보다 그림 1과 같이 불규칙적으

로 변동되는 클러스터가 된다. 도착각의 변동 형태도 가지거리와 비가지거리의 장애물 환경, 사용지역 등의 조건에 따라 다양한 특성을 가지는데, 저속 초광대역 방식의 채널은 9개로 구분한다⁷⁾. 협대역 통신 환경에서 도착각 변수가 고정 값이라는 가정하에서 세운 종래의 도착각 추정기법의 신호모형은 저속 초광대역 환경에서 새로 세워야 한다.

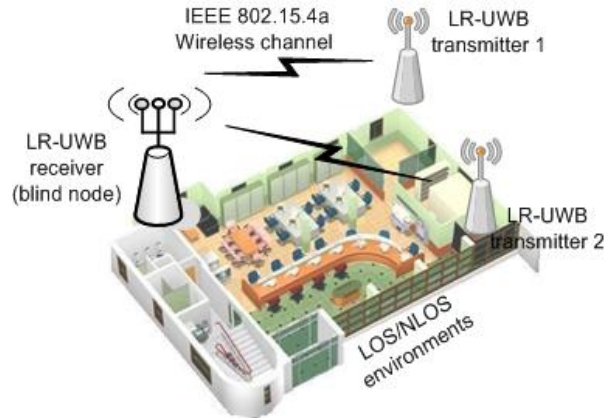


그림 2. 저속 초광대역 통신 방식 기반 무선 측위 시스템.
Fig. 2. LR-UWB communication based wireless positioning system.

저전송율 초광대역 신호가 IEEE 802.15.4a 채널의 클러스터링 효과를 거쳐 그림 2의 저전송율 초광대역 수신기의 배열 안테나에 그림 1과 같이 입력될 때, l 번째 ($l = 1, 2, \dots, L$) 안테나 소자에 받은 신호는 초광대역 특성과 이전연구결과^{8,9)}를 참조하면 다음과 같이 표시된다.

$$y^l(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^G \sum_{m=1}^Q \alpha_{i,j,m} x_i(t - \tau_{i,j,m} + lR \sin \theta_{i,j,m}) + \eta^l(t) \quad (1)$$

여기서, $x_i(\cdot)$ 는 클러스터 형태로 수신된 l 번째 단일 저전송율 초광대역 신호 파형으로 정규 펄스의 2차 미분된 형태이다. 전송된 저전송율 초광대역 신호 수는 M , 클러스터와 다중경로 수는 각각 G 와 Q 이며, $\alpha_{i,j,m}$ 와 $\tau_{i,j,m}$ 는 각각 i 번째 신호, j 번째 클러스터의 m 번째 다중 경로의 크기 및 시간 지연이다. $R \equiv D/cL$ 은 안테나 특성을 나타내며, D 는 다중 안테나의 전체 길이, c 는 빛의 속도이다. $\eta^l(t)$ 는 l 번째 안테나 소자의 가산성 정규 잡음이다. 그림 2의 저전송율 초광대역 기반 무선측위시스템에 필요한 매개변수는 수신신호세기(RSS)

또는 도착시간 (TOA)이 아니고, 단지 도착방향이므로, 분석을 위해 식(1)에서 감쇄크기 $\alpha_{i,j,m}$ 는 $\bar{\alpha}_i = \frac{1}{GQ} \sum_{j=1}^G \sum_{m=1}^Q \alpha_{i,j,m}$ 인 평균 감쇄 크기로, 시간지연 변수 $\tau_{i,j,m}$ 은 평균 시간지연 $\bar{\tau}_i = \frac{1}{GQ} \sum_{j=1}^G \sum_{m=1}^Q \tau_{i,j,m}$ 로 하자. 실제 저전송율 초광대역 채널은 주로 단거리 실내 통신으로, 평탄 감쇄 (flat fading) 특성이므로, 각 경로들 사이의 시간지연차이가 적다^[7-8]. 또한, 각 경로의 도착방향과 시간지연, 감쇄크기는 서로 상관관계가 매우 적다. 앞의 근사는 본래 초광대역 채널 특성과 다소 차이가 있지만, 저전송율 초광대역 기반 무선측위 환경을 위해, 적용하는 가정이다. 그러면, l 번째 안테나 소자에서 수신된 신호는 다음과 같다.

$$y^l(t) = \sum_{i=1}^M \bar{\alpha}_i \sum_{j=1}^G \sum_{m=1}^Q x_i(t - \bar{\tau}_i + lR \sin \theta_{i,j,m}) + \eta^l(t). \quad (2)$$

필요한 매개변수가 도착방향이므로 시간지연 변수와 분리하여 분석하기 위해 이산 주파수 영역으로 변환을 하면, l 번째 안테나 소자에서 얻은 수신된 신호의 스펙트럼은

$$Y^l(k) = \sum_{i=1}^M \bar{\alpha}_i e^{-jk\bar{\tau}_i} X_i(k) \left\{ \sum_{m=1}^Q e^{jklR \sin \theta_{i,1,m}} + \sum_{m=1}^Q e^{jklR \sin \theta_{i,2,m}} + \dots + \sum_{m=1}^Q e^{jklR \sin \theta_{i,G,m}} \right\} + \Gamma^l(k), \quad (3)$$

여기서 $\bar{\alpha}_i, \bar{\tau}_i, X_i(k), \Gamma^l(k)$ 는 $\alpha_i, \tau_i, x_i(t), \eta^l(t)$ 의 이산 주파수 영역의 각각 대응 값들이다.

분석을 위해 다음과 같이 정의하자.

$$a^l(\phi_i) \equiv \sum_{m=1}^Q e^{jklR \sin \theta_{i,1,m}} + \sum_{m=1}^Q e^{jklR \sin \theta_{i,2,m}} + \dots + \sum_{m=1}^Q e^{jklR \sin \theta_{i,G,m}} \quad (4)$$

그러면, 식 (3)을 다시 쓰면,

$$Y^l(k) = \sum_{i=1}^M \bar{\alpha}_i \widetilde{X}_i(k) a^l(\phi_i) + \Gamma^l(k), \quad (5)$$

여기서, $\widetilde{X}(k) = e^{-jk\bar{\tau}_i} X_i(k)$ 이다.

$$\begin{aligned} \underline{Y}(k) &= [Y^1(k) \dots Y^l(k) \dots Y^L(k)]^T \\ \underline{X}(k) &= [\widetilde{\alpha}_1 \widetilde{X}_1(k) \dots \widetilde{\alpha}_i \widetilde{X}_i(k) \dots \widetilde{\alpha}_M \widetilde{X}_M(k)]^T, \\ \underline{\Gamma}(k) &= [\Gamma^1(k) \dots \Gamma^l(k) \dots \Gamma^L(k)]^T, \\ A &= [a(\phi_1) \dots a(\phi_2) \dots a(\phi_M)], \\ a(\phi_i) &= [a^1(\phi_i) \dots a^l(\phi_i) \dots a^L(\phi_i)]^T \text{로 정의된} \\ &\text{벡터와 행렬 개념을 사용해 } M \text{ 센서에 수신된 스펙트럼 벡터를 구하면,} \end{aligned}$$

$$\underline{Y}(k) = A \underline{X}_\alpha(k) + \underline{\Gamma}(k), \quad (6)$$

이며 공분산 행렬은

$$\begin{aligned} R_Y &= E\{\underline{Y}(k)\underline{Y}^H(k)\} \\ &= A R_X A^H + \sigma I. \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 여기서, $R_X = E\{\underline{X}_\alpha(k)\underline{X}_\alpha^H(k)\}$ 와 $E\{\underline{\Gamma}(k)\underline{\Gamma}^H(k)\} = \sigma I$ 이다. 이 논문에서는 전송된 신호 클러스터들 사이는 서로 상관관계가 없다고 가정하며, R_X 와 R_Y 의 크기는 각각 M 과 L 이다.

III. 평균기중 다중신호 분류 도착각 추정 기법

무선측위에 필요한 도착각 매개변수를 얻기 위해 사용되는 추정 알고리즘들 중에 많이 사용되는 기법은 성능이 우수하고 계산량이 작은 다중신호 분류 (Multiple Signal Classification, MUSIC)기법^[4]이다. 그런데, 그림 2의 저전송율 초광대역 기반의 무선측위에서 도착각 매개변수 추정에 적용할 경우, 채널의 클러스터링 효과로 그림 1과 같이 도착각 매개변수의 불규칙 특성, 첫번째 클러스터와 다른 클러스터들과의 중심각 불일치 등의 심각한 추정 방해로 정확한 추정이 어렵다. 이 논문에서는 IEEE 802.15.4a 채널의 클러스터링 효과를 고려하여 새로운 평균 기중 기반의 도착각 매개변수 추정 기법을 제안한다.

IEEE 802.15.4a 채널 연구^[7]에 보면, 도착각 매개변수가 확률분포 성질에 따라 시간에 따라 불규칙적인 값이며 균일 분포 특성을 가진다. 또한 채널의 클러스터링은 클러스터 수 G 가 수 개이며, 다중경로 수는 수백~수천개 정도로 측정이 된다. 그림 1의 클러스터링 효과가 배열 안테나에 있는 경우, 균일 확률분포 특성을 가진 도착각 변수에 의한 주사벡터를 분석하기 위해 다음과 같이 각도 응답함수를 정의하자.

$$m^l(\phi) \equiv E\{e^{jklR \sin\theta}\} = \int e^{jklR \sin\theta} p(\theta) d\theta, \quad (8)$$

여기서, $p(\theta)$ 는 θ 의 확률밀도함수이며, 평균이 Θ 이고 분산이 ρ 인 균일 확률변수로 최대최소값들이 각각 $\pm\rho$ 에서 분포되는 경우

$$m^l(\Theta, \rho) = \int_{\Theta-\rho}^{\Theta+\rho} \frac{1}{2\rho} e^{jklR \sin\theta} d\theta = \text{sinc}(klR\rho) e^{jklR\Theta}, \quad (9)$$

θ 의 평균은 Θ 로 클러스터 중심각이며, ρ 는 각도 퍼짐 정도이다.

그림 1과 같이 IEEE 802.15.4a 채널에 의한 클러스터 효과를 보면, 대체로 클러스터 크기는 감쇄로 급격히 지수함수 형태로 감쇄되고 몇 번째 클러스터 이후의 크기는 매우 작아 무시가 가능하다. 클러스터의 각도퍼짐 정도도 0에서 최대값까지 다양한 값을 가질 수 있으며, 각각에 대해 몇 가지 주사벡터를 고려할 수 있다.

보기: 클러스터 형태에 따른 다양한 주사벡터들

1) 클러스터의 중심각들과 각도퍼짐 정도가 서로 차이가 없는 경우, 즉 $\Theta_i = \Theta_{i,1} \simeq \Theta_{i,2} \simeq \dots \simeq \Theta_{i,G}$ 와 $\rho_i = \rho_{i,1} \simeq \rho_{i,2} \simeq \dots \simeq \rho_{i,G}$ 일 때, 각도응답 함수를 사용해서 배열 안테나의 구조 특성을 나타내는 주사벡터는 다음과 같다.

$$a^l(\Theta_i, \rho_i) = \{ \text{sinc}(klR\rho_{i,1}) + \text{sinc}(klR\rho_{i,2}) + \dots + \text{sinc}(klR\rho_{i,G}) \} e^{jklR \sin\Theta_i} = G \cdot \text{sinc}(klR\rho_i) e^{jklR \sin\Theta_i} \quad (10)$$

이 경우는 각도 응답함수 $m^l(\Theta, \rho)$ 를 클러스터 수 G 로 가중한 것이다. 이전연구^[6]에서 일반적인 초광대역 환경에서 이런 경우를 고려해 평균주사 벡터로 하여 도착각 매개변수 추정을 하였다.

2) 클러스터의 중심각들이 일치하고 각도퍼짐 정도가 다양하게 0에서 최대값 ρ_{\max} 사이인 경우, 즉 $\Theta_i = \Theta_{i,1} \simeq \Theta_{i,2} \simeq \dots \simeq \Theta_{i,G}$ 와 $0 \leq \{\rho_{i,1}, \rho_{i,2}, \dots, \rho_{i,G}\} \leq \rho_{\max}$ 일 때, 클러스터 크기가 작은 것을 무시하고 클러스터 둘의 산술평균이나 기하평균을 고려한 주사벡터는 다음과 같다.

$$a^l(\Theta_i, \rho_{\max}) = \frac{1 + \text{sinc}(klR\rho_{\max})}{2} e^{jklR \sin\Theta_i} \quad (11)$$

또는

$$a^l(\Theta_i, \rho_{\max}) = \sqrt{\text{sinc}(klR\rho_{\max})} e^{jklR \sin\Theta_i} \quad (12)$$

이 논문에서는 저전송율 초광대역 환경에서의 이런 경우를 고려해 주사벡터를 평균가중 벡터로 하여 도착각 매개변수 추정을 한다.

3) 클러스터의 중심각들과 각도퍼짐 정도가 서로 다른 경우, 즉 각도응답 함수를 사용해서 배열 안테나의 구조 특성을 나타내는 주사벡터는 다음과 같다.

$$a^l(\Theta_{i,1}, \Theta_{i,2}, \dots, \Theta_{i,G}, \rho_{i,1}, \rho_{i,2}, \dots, \rho_{i,G}) = \text{sinc}(klR\rho_{i,1}) e^{jklR \sin\Theta_{i,1}} + \text{sinc}(klR\rho_{i,2}) e^{jklR \sin\Theta_{i,2}} + \dots + \text{sinc}(klR\rho_{i,G}) e^{jklR \sin\Theta_{i,G}} \quad (13)$$

평균가중 주사벡터를 사용해 식을 단순화 하면, l 번째 안테나 소자에서 얻은 수신된 신호의 스펙트럼은

$$Y^l(k) = \sum_{i=1}^M \tilde{\alpha}_i \tilde{X}_{i(k)} a^l(\Theta_i, \rho_i) + \Gamma^l(k), \quad (14)$$

이다. 매개 변수 Θ_i, ρ_i 를 추정하기 위해, 종래의 다

중신호분류 부공간 기법과 유사하게 먼저, 수신된 신호의 공분산 행렬 R_Y 의 고유분해를 통해 얻은 고유값을 크기순대로 다음과 같이 나열한다. $\{\lambda_1 > \dots > \lambda_M > \lambda_{M+1} = \dots = \lambda_L\}$. 이 중에서 고유값 $\{\lambda_{M+1}, \dots, \lambda_L\}$ 에 해당하는 고유벡터를 모아서 잡음 부공간을 얻는다. $G = \{e_{M+1}, \dots, e_L\}$. 수신된 신호의 공분산 행렬 식(6)과 잡음 부공간 G 를 사용해 다음 성질을 얻는다.

$$R_Y \cdot G = AR_X A^H \cdot G + \sigma I \cdot G = \sigma G, \quad (15)$$

정리하면,

$$\underline{a}(\theta, \rho)^H G G^H \underline{a}(\theta, \rho) = 0, \quad \text{for } (\theta, \rho) \in \{(\theta_{1, \rho_1}), \dots, (\theta_{M, \rho_M})\} \quad (16)$$

이다. 표본 공분산 행렬을 고려해 영 스펙트럼을 정의하면

$$f(\theta, \rho) = \underline{a}(\theta, \rho)^H \hat{G} \hat{G}^H \underline{a}(\theta, \rho). \quad (17)$$

이다.

IV. 모의실험

2장과 3장에서 앞에서 제안된 IEEE 802.15.4a 채널 기반의 저속 초광대역 신호 모형과 평균 기중 기반의 도착각 매개변수 추정 기법의 타당성을 위해서, 제안 기법의 컴퓨터 모의실험과 분석을 수행하였다. 그림 2의 IEEE 802.15.4a 채널의 무선측위 시스템에서 저속 초광대역 송신기 1과 기준마디 2로부터 전송된 신호들은 미지 목표마디인 초광대역 수신기의 배열 안테나로 수신된다. 이때, 배열 안테나 구성은 센서 수 L 은 5이다. IEEE 802.15.4a 채널은 거주지역, 사무실, 실내외, 산업 또는 농장 지역 등의 다양한 조건과 가시거리(LOS)와 비가시거리(NLOS) 장애물 등의 영향을 받는 환경인데, 클러스터 수가 큰 값으로 주로 실외 환경인 경우 ($G > 10$)와 사무실이나 거주지역인 클러스터 수가 작은 값의 경우 즉, $G \leq 3 \sim 4$ 로 구분이 되어, 채널 특성이 다르므로 각각에 적합한 도착각 매개변수 추정 기법을 적용해야 된다.

4.1 평균기중 주사벡터 기반의 도착각 추정

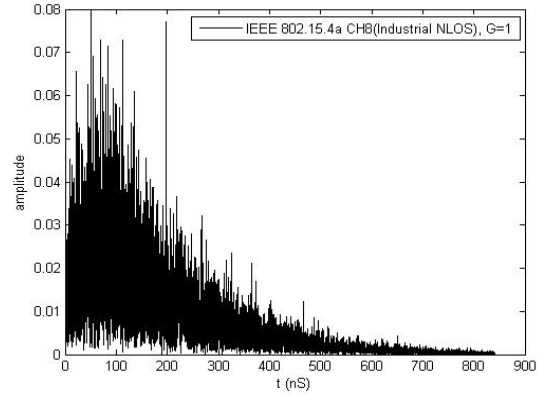


그림 3. IEEE 802.15.4a CH8(비가시거리 산업환경) 채널의 충격 응답.
Fig. 3. Impulse response for IEEE 802.15.4a CH8.

그림 2와 유사한 건물 사무실내 비가시거리 환경인 IEEE 802.15.4a CH8에서 반송파 주파수 $f_C = 6[\text{GHz}]$, 표본 주파수 $f_S = 8[\text{GHz}]$, 클러스터 도착시간 $L_{am} = 0.089[\text{nsec}]$, 클러스터 평균수 $L_{mean} = 1$ 이며, 포아송 분포의 도착시간 특성 $p(T_i | T_{i-1}) = \Lambda_i e^{-\Lambda_i (T_i - T_{i-1})}$ 을 가지며, 클러스터 내 다중경로의 도착시간은 포아송 분포 $p(\tau_{k,l} | \tau_{k-1,l}) = \beta \lambda_1 e^{\lambda_1 (\tau_{k,l} - \tau_{k-1,l})} + (\beta - 1) \lambda_2 \cdot e^{\lambda_2 (\tau_{k,l} - \tau_{k-1,l})}, k > 0$ 와 같이 $\lambda_1 = 1[\text{nsec}]$, $\lambda_2 = 1[\text{nsec}]$, $\beta = 1$ 값을 가진다.

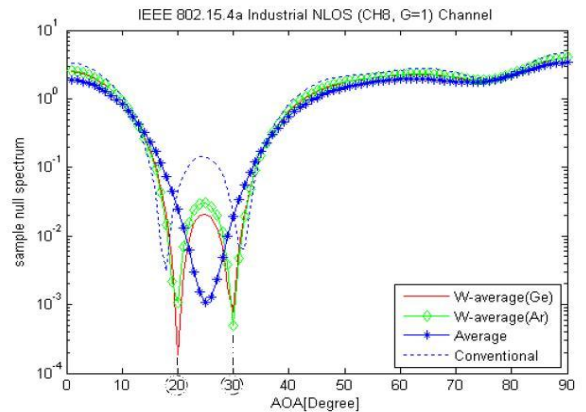


그림 4. IEEE 802.15.4a CH8채널 조건의 무선 측위 환경에서 $\hat{\rho} = 7^\circ$, $L = 5$, $M = 2$, $SNR = 20\text{dB}$, $(\theta_{1, \rho_1}) = (20^\circ, 7^\circ)$, $(\theta_{2, \rho_2}) = (30^\circ, 7^\circ)$, 조건을 가지고 식(10)의 평균기중 주사벡터 기반 신호도착 방향 추정 기법을 사용하여 얻은 식(17)식의 영스펙트럼 $f(\theta, \rho)$ 결과들.
Fig. 4. Null Spectrums obtained from Equations (10) and (17) under IEEE 802.15.4a CH8.

이때, 다중경로 신호의 도착방향 매개변수는 클러스터 중심인 도착각 매개변수를 평균으로 가지며 균일 확률 분포 특성을 가진다. 그림 3의 결과를 보면 클러스터 수는 3개보다 적은 1개이므로 평균 가중 벡터 기반의 도착각 매개변수 추정 방식 조건에 적합하다. 그래서, 그림 3의 비가시거리 사무실 채널 환경에서 3장의 (10)식인 평균가중 주사벡터 기반의 다중신호분류 매개변수 추정 방식을 사용해 얻은 스펙트럼이 그림 4에 있다. 여기서, 그림4의 실험조건은 비가시거리 거주지 특성의 CH8 환경에서 클러스터 효과를 전혀 고려하지 않은 종래의 다중신호 분류 도착각 추정 기법[4], 3장의 식(9)를 고려한 평균 주사벡터 기반의 수정된 다중신호분류 도착각 추정기법[6], 그리고 클러스터의 각도퍼짐 특성을 고려한 식(10)과 식(11)의 평균 가중 주사벡터 기반의 수정된 다중신호분류 도착각 추정기법 등의 4가지 방법을 적용해서 얻은 식 (16)의 도착각 매개변수 추정을 위한 다중신호 분류 스펙트럼들이다. 그림 2의 환경에서 전송된 저속 초광대역 신호는 $(\theta_1, \rho_1) = (20^\circ, 7^\circ)$, $(\theta_2, \rho_2) = (30^\circ, 7^\circ)$ 조건으로 매트랩을 사용해 생성하며, 수신 안테나 수는 $L = 5$, 그리고 신호 대 잡음비는 $SNR = 20$ dB이다. 그림 4의 결과에서 종래 기법으로 얻은 스펙트럼은 '...'로 표시되고, 평균 주사벡터 방식 기반 기법으로 얻은 스펙트럼은 '-*-', 그리고 평균 가중 주사벡터 기반의 도착각 추정기법 스펙트럼은 기하평균은 '-·', 산술평균은 '-·◇·'로 각각 표시되었는데, 그림에서 정확한 도착각 추정치를 얻은 도착각 기법은 평균 가중 주사벡터 기반 기법임을 볼 수 있다.

또한, 실외지역으로 장애물이 있는 비가시거리 조건의 농장 또는 눈 내린 지역의 채널 특성인 IEEE 802.15.4a의 CH9 채널과 건물 사무실 내 비가시거리 조건의 채널 특성인 IEEE 802.15.4a CH2 채널에서도 클러스터 수가 그림 3의 IEEE 802.15.4a CH8 채널과 유사하게 클러스터 수가 각각 $G=3.31$, $G=3.5$ 을 가진다. 이런 환경에서도 그림 4의 결과와 비슷하게 해석할 수 있다. 곧, IEEE 802.15.4a의 CH2와 CH9 채널 환경에서 3장의 (11)식인 평균가중 주사벡터 기반의 다중신호분류 매개변수 추정 방식을 포함해 얻은 스펙트럼 결과에서도 그림 4의 결과와 마찬가지로 종래 또는 평균 주사벡터 기반 추정 기법보다 평균가중 주사벡터 기반 추정기법이 정확한 도착각 추정이 가능

하다. 그래서, 그림 4 결과로 부터 클러스터가 적게 발생하는 거주지 또는 사무실, 농장이나 눈 내린 특수 지역의 채널 환경들에서는 클러스터 효과를 고려하여 종래 방식 또는 평균기반 방식보다 평균가중 방식 기반의 추정기법을 사용해야 됨을 볼 수 있다.

4.2 평균 주사벡터 기반의 도착각 추정

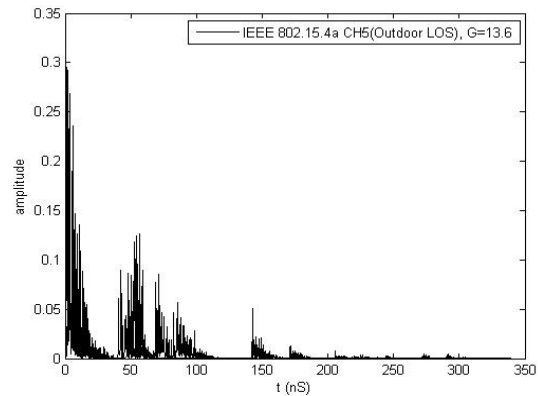


그림 5. IEEE 802.15.4a CH5(가시거리 실외환경) 채널의 충격 응답.
Fig. 5. Impulse response for IEEE 802.15.4a CH5.

실외지역으로 가시거리와 비가시거리 조건의 IEEE 802.15.4a CH 5와 CH6의 채널 특성은 비교적 클러스터가 많이 발생하는 채널 특성을 가지며 평균 클러스터 수가 각각 $G=13.6$, $G=10.5$ 로, 앞 절의 IEEE 802.15.4a CH8와 CH9 특성과 다르다. 클러스터가 많은 채널에 적합한 도착각 추정 기법을 알기 위해, 네 가지 추정기법을 적용해보자. $L=5$, $(\theta_1, \rho_1) = (20^\circ, 7^\circ)$, $(\theta_2, \rho_2) = (30^\circ, 7^\circ)$, $M=2$, $\hat{\rho}=7^\circ$. $SNR=20$ dB와 같은 실험 조건에서 앞 절과 같이 모의실험을 수행한다. 그림 5는 가시거리가 보장되는 실외 지역 채널 특성인 IEEE 802.15.4a CH 5의 채널 충격 응답 함수를 보여 주는데, 그림 3의 비가시거리 거주지역의 채널 충격 응답 함수 특성과 많이 다르다. 실험조건은 반송파 주파수 $f_c = 6$ [GHz], $f_s = 8$ [GHz]의 표본 주파수, 클러스터 도착시간 $L_{am} = 0.0048$ [nsec], 클러스터 평균수는 $L_{mean} = 13.6$ 이며, 또한, 포이송 분포 도착시간은 $\lambda_1 = 0.27$ [nsec], $\lambda_2 = 2.41$ [nsec], $\beta = 0.0078$ 값을 가진다.

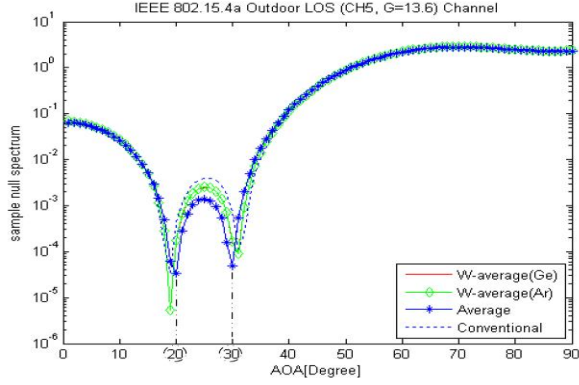


그림 6. IEEE 802.15.4a CH5 (가시거리 실외환경) 채널 조건의 무선 측위 환경에서 $L=5$, $M=2$, $(\theta_1, \rho_1) = (20^\circ, 7^\circ)$, $(\theta_2, \rho_2) = (30^\circ, 7^\circ)$, $\hat{\rho} = 7^\circ$, $SNR = 20\text{dB}$ 조건을 가지고 식(11)의 평균가중 주사벡터 기반 신호도착 방향 추정 기법을 사용하여 얻은 식(17)식의 영스펙트럼 $f(\theta, \rho)$ 결과들.
Fig. 6. Null Spectrums obtained from Equations (11) and (17) under IEEE 802.15.4a CH5.

그림 6은 그림 5의 채널 환경에서 네 가지 추정 기법을 사용해 얻은 스펙트럼들로 종래 기법으로 얻은 스펙트럼은 '...'로 표시된 것이며, 평균 주사벡터 방식 기반 기법의 스펙트럼은 '-*-' , 그리고 평균 가중 주사벡터 기반의 도착각 추정기법 스펙트럼은 기하평균일 때 '-○-', 산술평균은 '-◇-'로 나타났다. 그림 6에서 보면 정확한 도착각 추정치를 얻은 도착각 기법은 앞 절과 다르게 평균 가중 방식 기반 추정기법이 아니고, 평균 주사벡터 기반 기법임을 알 수 있다.

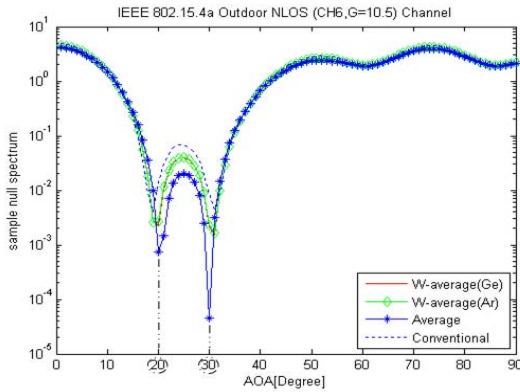


그림 7. IEEE 802.15.4a CH6 (비가시거리 실외환경) 채널 조건의 무선 측위 환경에서 $L=5$, $M=2$, $(\theta_1, \rho_1) = (20^\circ, 7^\circ)$, $(\theta_2, \rho_2) = (30^\circ, 7^\circ)$, $\hat{\rho} = 7^\circ$, $SNR = 20\text{dB}$ 조건을 가지고 식(11)의 평균가중 주사벡터 기반 신호도착 방향 추정 기법을 사용하여 얻은 식(17)식의 영스펙트럼 $f(\theta, \rho)$ 결과들.
Fig. 7. Null Spectrums obtained from Equations (11) and (17) under IEEE 802.15.4a CH6.

그림 5의 채널 환경과 유사하게 클러스터 수가 많으며, 비가시거리 조건의 실외지역 무선 채널 특성인 IEEE 802.15.4a CH 6 채널에서도 그림 6과 유사한 결과를 얻는데, 즉 네 가지 추정기법을 적용해 얻은 다중신호 분류 스펙트럼들이 그림 7에 있다. 그림 7에서 보면, 그림 6 결과와 유사하게 평균 주사벡터 방식을 사용하는 추정기법이 종래 또는 평균 가중 주사벡터 보다 정확한 도착각 추정치를 얻음을 볼 수 있다.

4.3 제안방식의 성능검증

제안 방식의 성능이 우수함을 보이기 위해, 매개 변수 추정치 $(\hat{\theta}_i, \hat{\rho}_i)$ 의 추정오차의 점근적 통계 성질을 사용해서 추정치의 분산을 구해 비교해 보자. 추정치들은 식 (17) 비용함수를 만족하는 국소 최소값들이므로 $f'(\hat{\theta}_i, \hat{\rho}_i) = 0$ 와 $f'(\hat{\theta}_i, \hat{\rho}_i) \approx f'(\theta_i, \rho_i) + H(\theta_i, \rho_i)\underline{\epsilon}_i$ 관계를 테일러 전개식으로 구할 수 있다. 여기서, $\underline{\epsilon}_i = [\hat{\theta}_i - \theta_i, \hat{\rho}_i - \rho_i]^T$ 추정오차 벡터이며, $f'(\theta, \rho)$ 과 $H(\theta, \rho)$ 는 각각 (17)식의 1계, 2계 함수이다. 이전연구 결과[6]으로부터 추정오차의 공분산 행렬은 다음과 같이 구한다.

$$C_i = E[\underline{\epsilon}_i \underline{\epsilon}_i^T]. \quad (18)$$

그림 8의 결과에서 (18)식을 사용하여, 제안 방식과 종래방식에서 얻은 신호 도착각 추정 오차의 분산을 비교해 보면 신호대 잡음비를 변화시켜도 항상 제안 방식의 성능이 우수함을 알 수 있으며, 또한 제안 방식은 신호대 잡음비가 증가함에 따라 추정오차가 감소함도 알 수 있다.

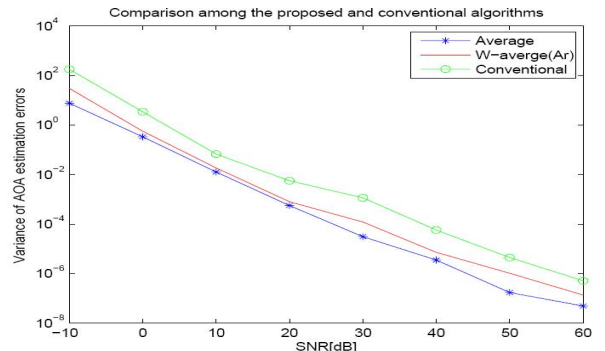


그림 8. 모의실험 실험조건이 $L=5$, $M=2, N=1000$ $(\theta_1, \rho_1) = (20^\circ, 5.6^\circ)$, $(\theta_2, \rho_2) = (30^\circ, 7.5^\circ)$ 일 때, 신호 도착각 추정 오차의 분산과 신호대 잡음비 관계에 따른 제안 방식과 기존 방식의 성능비교.
Fig. 8. Performance comparison between the proposed and conventional techniques depending on AOA estimation error and SNR.

V. 결 론

IEEE802.15.4a 표준 채널 환경에 적합한 신호모형과 평균가중 기반의 도착각 추정기법을 제안하여 저속 초광대역 방식에 근거한 무선측위 시스템에 사용되는 클러스터 신호의 도착각 매개변수를 추정하고, 종래 추정방식들과 비교해 추정성능이 우수한 방식을 알아보았다.

수신 안테나에 생기는 클러스터 효과를 일반화시켜 IEEE 802.15.4a 채널 특성을 가진 저속 초광대역 무선 측위에 적합한 신호 모형을 세우고, 클러스터 신호의 도착각 매개변수 추정을 위해 평균가중 기반의 수정된 다중신호 분류 추정 방식을 제안하였다. 클러스터 특징에 따라 적용할 수 있는 평균 주사벡터와 평균 가중 주사벡터 기반의 도착각 추정기법을 제안 하였다.

컴퓨터 모의실험을 통해, 클러스터 수가 많은 채널 환경에서는 평균 주사벡터기반의 도착각 추정방식이, 클러스터 수가 작은 채널에서는 평균가중 주사벡터 방식의 도착각 추정이 더 정확함을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 한림대학교 교비연구비(HRF-201109-057) 지원과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0026886).

참 고 문 헌

- [1] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks," *IEEE Comm. Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, FIRST QUARTER 2009.
- [2] A. H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, "Network-based Wireless Location," *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 22, pp. 24-40, July 2005.
- [3] A. F. Molisch et al., "A Comprehensive Standardized Model for Ultrawideband Propagation Channels," *IEEE Tr. Ant. Prop.*, vol. AP-54, no. 11, pp. 3151-3166, Nov. 2006.
- [4] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Tr. Ant. Prop.*, vol. AP-34, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [5] J. Mietzner, R. Schober, L. Lampe, W. Gerstacker, and P.A. Hoeher, "Multiple-Antenna Techniques for Wireless Communications - A Comprehensive Literature Survey," *IEEE Comm. Surveys and Tutorials*, vol 11, no. 2, pp. 87-105, SECOND QUARTER 2009.
- [6] Y. U. Lee, "Cluster Angle of Arrival Estimation for UWB Indoor System," *IEICE Tr. Comm.*, vol. E88-B, no.11, pp. 4402-4405, Nov 2005.
- [7] A. F. Molisch et al., IEEE 802.15.4a channel Model, 2005.
- [8] J. M. Cramer, R.A. Scholtz, and M.Z. Win, "Evaluation of an ultrawideband propagation channel," *IEEE Tr. Ant. Prop.*, vol. 50, no. 5, pp. 1-9, May 2002.
- [9] J. D. Taylor, Introduction to Ultra-wideband Radar Systems, CRC Press, September 2002.

이 용 업 (Yong Up Lee)

중신회원



1985년 서울대학교 전자공학과 공학사

1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사

1996년 한국과학기술원 전기 및 전자과 공학 박사

2004년 호주 UNSW 방문교수

2011년 미국 펜실바니아주립대 방문교수

1998년~현재 한림대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 무선통신, 무선위치인식 시스템, 가시광 통신 융합 서비스

임 경 순 (Kyeong Sun Lim)

준회원



2010년 한림대학교 전자공학과 공학사

2010년 한림대학교 전자공학과 대학원 공학석사

<관심분야> 무선통신, 무선위치인식 시스템, 가시광 통신

박 주 현 (Jooheon Park)

준회원



2011년 한림대학교 전자공학과 공학사

2011년~현재 한림대학교 전자공학과 대학원 석사과정

<관심분야> 무선통신, 무선위치인식 시스템, 가시광 통신