DBpia

논문 18-43-06-20 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '18-06 Vol.43 No.06
https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.6.1051

초광대역 레이더 신호의 실내 전파 시 발생하는 고강도 고스트 경로의 실험적 분석

김 대 웅◆, 이 준 용°

Experimental Analysis of Strong Ghost Path for Indoor UWB Radar Signal Propagation

Dae-Woong Kim◆, Joon-Yong Lee°

요 약

본 논문에서는 초광대역 레이더를 이용한 실내 위치 추적 과정에서 발생하는 고강도 고스트의 특성 분석 결과를 개시한다. 대칭간접경로 혹은 차단산란에 의해 발생하는 고강도 고스트는 위치추적의 정확도를 현저히 저하시킬 수 있다. 시간영역에서의 레이더 측정 실험을 통해 고강도 고스트가 발생하는 원인을 살펴보고, 고강도 고스트가 갖는 전력 특성과 지역 확산 특성, 그리고 주파수 특성을 분석하였다. 또한 다중검정기법을 이용한 실내 위치 추적 시나리오에서 고강도 고스트가 미치는 영향에 대해서 살펴보았다.

Key Words : Ultra-wideband, Radar tracking, Indirect path, Ghost rejection, Strong ghost

ABSTRACT

This paper presents the result of an experimental characterization of strong ghost path for indoor ultra-wideband (UWB) radar tracking. Strong ghost, which is generated by symmetric indirect path or blocked scatterer, can significantly reduce the accuracy of moving target tracking. Sets of radar experiments are conducted in time domain to examine the cause of strong ghost path. Power and frequency characteristics and delay spread are analyzed. Effect of strong ghosts on the accuracy of two-dimensional moving target tracking is also examine.

Ⅰ. 서 론

시간 영역에서의 높은 분해능을 갖는 초광대역 (ultra-wideband, UWB) 레이더 센서를 이용한 위치 추적 기술은 GPS를 이용하기 어려운 실내 환경을 위한 유력한 대체 기술로 여겨져 왔다[1-3]. 그러나 위치 추적 과정에서 직접경로 (direct path) 신호와 고스트를 생성하는 간접경로 (indirect path) 신호를 구분하는 작업이 필요하며[4], 특히 전력이 높은 간접경로 신호는 위치추적의 정확도를 현저히 저하시킬 수 있고, 실제로 존재하지 않는 고스트 타겟 (target)을 발생시킨다. 따라서 레이더 기반의 위치추적 시 발생하는 고스트 신호를 제거하는 알고리듬에 대한 연구가 요구되어져 왔다. 대표적인 사례로 타겟 검출 단계에서 발

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2012R1A1A2041260).

◆ First Author : (ORCID:0000-0002-3994-2594)Department of Information and Communication Engineering, Handong Global University, daewoong0102@naver.com, 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-3469-8147)Department of Information and Communication Engineering, Handong Global University, joonlee@handong.edu, 정회원

논문번호 : KICS2018-02-039, Received February 17, 2018; Revised June 1, 2018; Accepted June 7, 2018

www.dbpia.co.kr

생하는 오차 확률을 일정하게 유지하기 위해 검출 문턱 (detection threshold)을 유동적으로 조절하는 CFAR (Constant False Alarm Rate) 알고리듬과 관련된 연구가 있다 [5-7]. 또한, 레이더 센서에서 타겟의 거리 계산 시 TOA, DOD, DOA 방식을 종합한 TDAJ 알고리듬을 적용하여 간접경로와 직접경로를 구분할 수 있음을 보인 연구 결과가 있으나[4], 이 기술은 TOA 방식으로 타겟의 거리를 계산하는 모노스태틱 (mono- static) 레이더 센서에는 적용할 수 없다는 한계점이 있다. 이 밖에도 타겟의 거리 측정 후 좌표를 계산하는 data association 단계에서 고스트를 제거하는 방법에 초점을 맞춘 알고리듬에 대한 연구 결과가 보고된 바 있고 [8,9], 논문 [10]에서는 UWB 레이더 트래킹 시 발생하는 간접경로 신호의 통계적 특성을 클러스터링 (clustering) 모델을 사용하여 모델링 한 바 있다.

본 논문에서는 UWB 레이더 센서를 이용한 실내 위치추적 시 발생하는 고스트 중, 일정 수준 이상의 전력을 갖는 고강도 고스트 (strong ghost)의 특성 분석에 초점을 맞추고 있다. 직접경로 신호의 경로손실 대비 일정 수준 이상의 강도를 갖는 고스트를 고강도 고스트로 정의하고, 실내 위치추적 시 고강도 고스트가 생성되는 원인과 그 통계적 특성에 대해 분석하였다. 또한, 2차원 위치추적 예시를 통해 고강도 고스트가 위치추적 과정에 어떤 영향을 미치는지에 대해서도 살펴보았다.

Ⅱ. 고강도 고스트 생성 원인

2.1 실험 환경

고강도 고스트의 생성 원인을 확인하기 위해 사전에 제어된 환경을 조성한 뒤 시간 영역에서 레이더 측정을 진행하였고, UWB 신호의 송수신을 위해 Time Domain 사에서 제작한 PulseOn 안테나를 이용하였다. 무지향성 (omnidirectional) 특성을 갖는 두 개의 수평 편파용 (vertically polarized) 안테나는 지상 60cm 높이의 스틸로폼 스탠드에 고정하고, Avtech 사에서 제작된 임펄스 생성기를 이용하여 매 1 μsec 마다 UWB 펄스를 송신하였다. 수신 안테나를 통해 수신된 신호를 저잡음 증폭기 (low noise amplifier)를 통과시킨 뒤, 디지털 샘플링스코프 (digital sampling scope)를 이용해 측정하였다. 신호 대 잡음비 (SNR)를 높이기 위하여 측정 신호 길이에 따라 256개에서 최대 1024개의 측정 신호를 평균 취하였다. 타겟은 높이 1.4 m, 지름 40 cm의 스틸로폼 모형을 사용하였으며, 수신된 신호성분의 경로를 보다 명확히 추적하기 위하여 타겟과 주요 산란점에 알루미늄 호일을 덧입혀 반사 계수가 높아지도록 하였다. 이로 인해 직접경로 신호와 간접경로 신호의 강도가 함께 증가하므로, 본 논문에서 정의한 고강도 고스트의 발생 빈도에는 영향을 미치지 않는다.

2.2 고스트의 생성 원인

레이더 측정 시 발생하는 고강도 고스트의 측정 원인은 크게 대칭 간접경로 (symmetric indirect path)와 차단 산란 (blocked scatter)으로 추정된다.

2.2.1 대칭 간접경로

대칭 간접경로는 타겟에서 먼저 반사되고, 이어서 산란점에서 반사되어 생성된 간접경로 신호와, 반대로 산란점에서 먼저 반사되고 그 후에 타겟에서 반사되어 수신된 간접경로 신호가 유사한 도착시간으로 인해 서로 보강간섭을 일으켜 그 강도가 커지는 경우를 의미한다. 대칭 간접경로에 의해 고강도 고스트가 생성되는 과정을 확인하기 위해 그림 1과 같이 실험 환경을 구성하였고, 이는 간접경로 신호의 이동 경로가 삼각형 형태를 이루는 경우이다. 직접경로 및 간접경로 신호는 (1)에 정의된 바와 같이 측정 신호와 기준 신호 (reference signal) 간의 차등신호로부터 검출될 수 있다:

$$r_{\mathrm{dif}}(\tau;t) = r(\tau;t) - r_{\mathrm{ref}}(t;\tau). \tag{1}$$

여기서 $r(\tau;t)$는 측정신호를 의미하고, τ는 전달지연 (propagation delay)을, t는 측정 시간 (measurement time)을 의미한다. 측정 신호에서 정적 클러터(clutter) 제거에 사용된 기준 신호 $r_{\mathrm{ref}}(\tau)$는 타

그림 1. 대칭 간접경로 신호 확인 실험.
Fig. 1. Experimental setup for generation of symmetric indirect paths.

www.dbpia.co.kr

겟이 없는 환경에서의 측정 신호 $r(\tau;0)$로 고정하였다.

실험은 타겟과 송신 안테나의 위치를 고정시킨 채, 수신 안테나를 타겟의 중심으로부터 80cm 떨어진 지점을 따라 이동시키면서 진행되었으므로, 직접경로의 길이는 최대한 일정하게 유지시킨 채 간접경로의 길이를 변화시켜가며 대칭 간접경로의 생성 여부를 관찰할 수 있었다. 그림 2는 실험 시나리오의 예시를 보여준다. 그림에 표시된 궤적을 따라 타겟 주위로 수신 안테나를 이동시키며 측정을 진행하였고, 그림 2에 나타낸 두 그림은 이 중 두 개의 위치에서의 예시를 보여준다. 직접경로와 간접경로를 광선 추적(ray tracing) 기법을 통해 추정하여 표시하였고, 직접경로와 가능한 2개의 간접경로를 함께 표기하였다.

그림 2에 나타난 바와 같이 안테나의 거리가 상대적으로 먼 거리에 있을 때 두 개의 간접경로의 길이의 차이 (differential path length)가 비교적 크게 나타나지만 (상), 가까워짐에 따라 간접경로의 길이의 차이가 경우 매우 작게 나타나, 대칭 간접경로가 생성됨을 볼 수 있다 (하). 그림 3은 그림 2에 나타난 두 개의 위치에서 측정된 신호를 보여준다. 점선으로 표시한 파형은 신호의 이동경로의 길이를 기반으로 복원된 (reconstructed) 신호로, 실선으로 표시된 측정 신호와

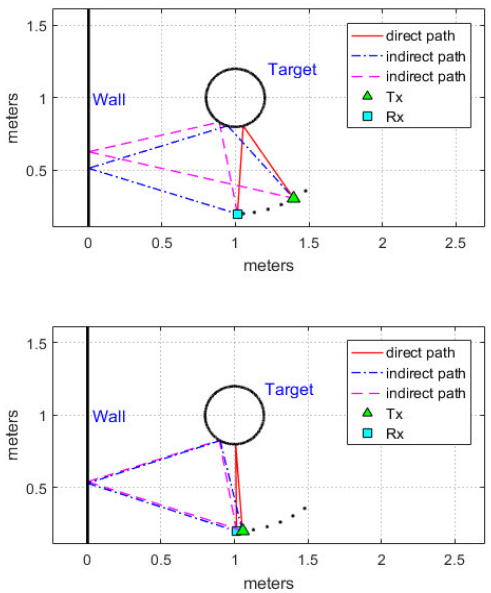

그림 2. 대칭된 간접경로의 거리 차이가 0.2623 m에 해당하는 위치(상)와 0.0032 m에 해당하는 위치(하)에서의 신호 전파 시나리오.
Fig. 2. Propagation scenario where differential path length between indirect paths is 0.2603 m (upper) and 0.0032m (lower).

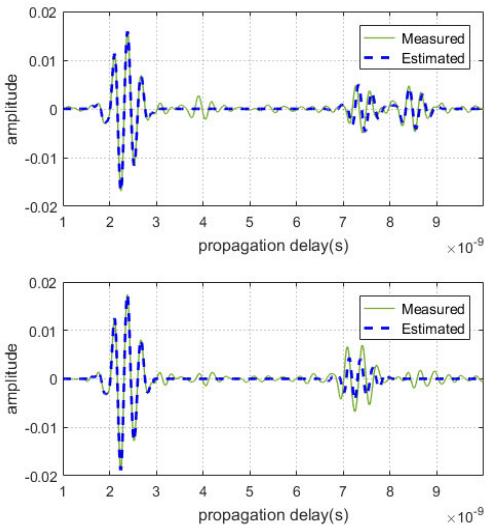

그림 3. 0.6560 m 거리에서 수신된 파형(상)과 0.1629 m에서 수신된 파형(하).
Fig. 3. Received waveforms at 0.6560 m (upper) and 0.1629 m (lower).

유사하게 나타남을 볼 수 있다. 그림 3의 위쪽 그림에서는 두 개의 간접경로 신호가 약 1ns 가량 떨어져 있으나, 아래쪽 그림의 경우 두 신호가 중첩됨을 확인할 수 있다.

그림 4는 대칭 간접경로가 발생할 수 있는 또 다른 시나리오의 실험 환경을 보여준다. 송수신 안테나를 벽의 산란점으로부터 1 m 떨어진 지점에 위치시키고, 직육면체 형태의 타겟을 직선경로로 이동시키며 측정을 진행하였다. 이때 그림 5에 나타난 바와 같이 타겟과 산란점, 그리고 송수신 안테나가 직선으로 배치되어 간접 경로간의 거리 차이가 매우 작아지게 되므로 (하) 대칭 간접경로의 발생을 예상할 수 있다. 그림 5

그림 4. 대칭 간접경로 세기 측정 실험.
Fig. 4. Experimental setup for generation of symmetric indirect paths.

www.dbpia.co.kr

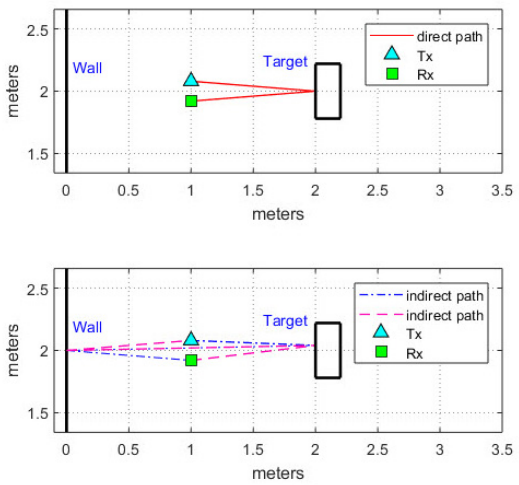

그림 5. 직접경로(상)와 간접경로(하)를 통한 신호 전파.
Fig. 5. Propagation through direct path (upper) and indirect path (lower).

의 전파 경로는 타겟을 송수신 안테나에서 1 m 떨어진 지점부터 3 m까지 50 cm 간격으로 이동시키며 측정한 실험 시나리오 중 타겟이 2 m 지점에 위치할 때의 예시를 보여주고, 그림 6은 위의 시나리오를 따라 측정된 신호를 제곱한 신호를 보여준다. 그림에서 가장 먼저 도착하는 신호들이 직접경로 신호이며, 타겟의 위치와 유사한 지점에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 뒤이어 관찰되는 신호들이 간접경로 신호 성분에 해당되고, 그 중 가장 먼저 도착하는 신호성분의 강도를 확인한 결과 직접경로 신호에 비해 최대 9.5 dB까지 크게 나타남을 볼 수 있었다. 간접경로가 직접경로에 비해 그 길이가 더 길기 때문에 간접경로 신

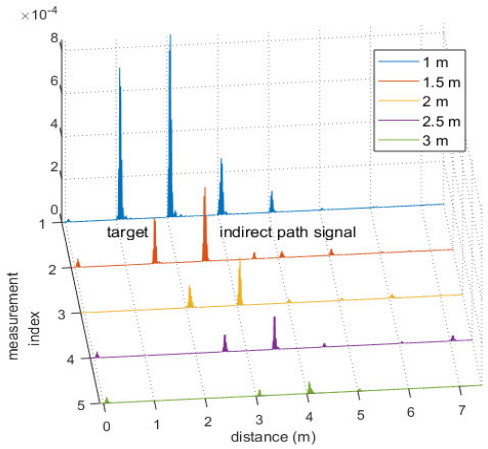

그림 6. 직접경로 및 간접경로 신호의 전력.
Fig. 6. Power of direct path and indirect paths signals.

표 1. 고강도 고스트 전력 세기.
Table 1. Excess power of strong ghost ray.

	distance [m]	Excess power of strong ghost ray [dB]
Symmetric indirect path ghost	1	9.5441
	1.5	8.6611
	2	8.4542
	2.5	8.7365
	3	6.5765
Blocked scatter ghost	2.215	−0.2602 .
	2.055	6.5456
	2	14.8702
	2.053	12.9753
	2.237	0.9184

호가 직접경로 신호에 비해 그 크기가 작게 관찰되는 것이 일반적이다. 그럼에도 이와 같은 결과가 관찰된 것은, 대칭 간접경로에 의한 보강간섭으로 생성된 고강도 고스트로 추정할 수 있다. 직접경로 신호의 전력 대비 고강도 고스트의 전력의 상대치가 표 1에 정리되어 있다.

2.2.2 차단 산란

차단 산란이란 기준 신호에 포함된 다중 경로 성분이 타겟에 의해 차단됨으로 인해 사라지는 현상을 의미하며, 이로 인해 차등신호 생성 과정에서 고스트가 발생하게 된다. 차단 산란 고스트의 생성을 확인하기 위해 그림 7과 같이 벽에서 4 m 떨어진 지점에 송수신 안테나를 설치하고, 타겟을 벽과 안테나 사이에서 벽과 평행하게 이동시키며 신호를 측정하였다. 차단 산란 고스트를 확인하기 위한 실험 시나리오 중 다중 경로 성분이 있을 때와 차단되는 경우의 전파 경로를

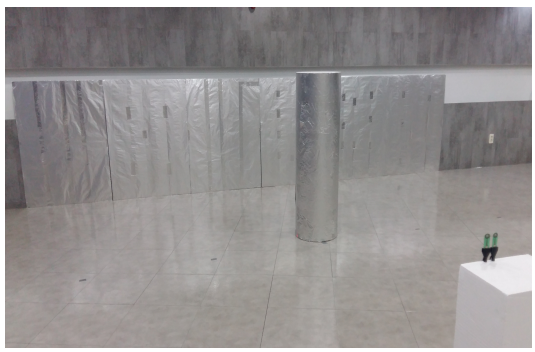

그림 7. 차단 산란 고스트 측정 실험.
Fig. 7. Experimental setup for measurement of ghost caused by blocked scatter.

www.dbpia.co.kr

그림 8에 나타내었고, 그림 9는 전체 시나리오에서 측정된 신호를 제곱한 신호를 보여준다. 그림 8에서 타겟이 1번 위치에 위치해 있을 때, 신호가 벽에 반사되어 수신되는 경로가 존재하며 (상), 이 신호 성분이 기준신호에 포함되게 된다. 타겟이 3번 위치로 이동할 경우 이 경로가 가로막혀짐으로 인해 (하), 매우 강한 고스트 성분이 나타나게 된다. 그림 9의 3번 그래프를 통해 이를 확인할 수 있으며, 이때 발생한 고스트의 전력이 타겟에 직접 반사된 신호 성분보다 14.8 dB나 크게 나타난 것을 확인할 수 있다 (표 1).

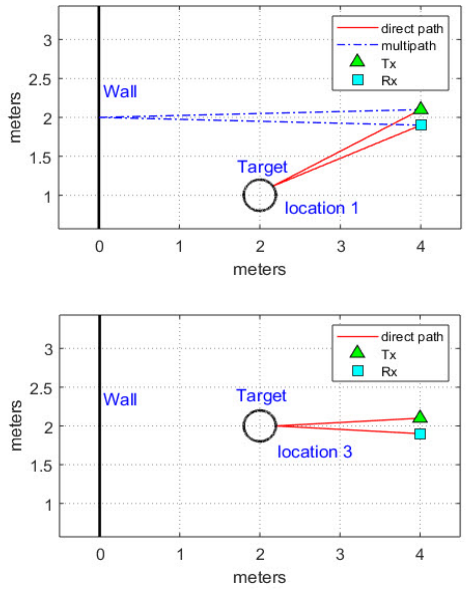

그림 8. 정적 클러터를 가로막지 않는 경우 (상)와 가로막는 경우 (하)의 신호 전파 시나리오.
Fig. 8. Propagation scenarios where target does (lower) and does not (upper) block the static clutter.

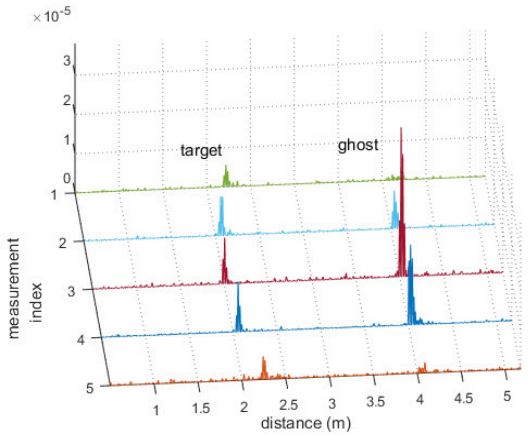

그림 9. 차단 산란 고스트 전력.
Fig. 9. Power of ghost signal caused by the blocked scatter.

Ⅲ. 고강도 고스트 경로의 특성 분석

3.1 실험 환경

실내 인체 위치추적 시나리오에서 발생하는 고강도 고스트 경로의 통계적 특성을 분석하기 위해 별도의 실험을 진행하였다. Time Domain 사에서 제작된 P400 모노스태틱 레이더를 60 cm 높이에 거치하고, 그 주위로 사람 한 명이 움직이는 상황에서 측정을 진행하였다. 한동대학교 교내 8개 장소에서 총 4,749개의 레이더스캔을 수집하였으며, 측정을 진행한 위치는 표 2에 정리되어 있다. 신호의 질을 높이기 위해 4,096개의 UWB 펄스를 송수신하여 얻어진 채널응답의 평균을 취하였고, 초당 10 개의 스캔을 수집하였다. 차등 신호 생성과정에서 기준 신호는 (2)와 같이, 이전 시점의 측정 신호 다섯 개를 이동 평균 취하여 생성하였다:

$$r_{\mathrm{dif}}(\tau;t) = r(\tau;t) - \frac{1}{5}\left(\sum_{k=1}^{5} r(\tau;t-kt_s)\right). \qquad (2)$$

여기서 t_s는 인접한 스캔간의 측정시간의 간격을 의미하며, 본 실험에서는 초당 10개의 스캔을 취하였으므로 0.1 s가 된다. 간접경로 신호 성분들 중 직접경로 신호의 전파경로손실 대비 상대적 강도가 일정 수준 이상 되는 성분들을 고강도 고스트로 분류하였기 때문에, 직접경로 신호의 경로손실 (path loss)을 구할 필요가 있다. 이를 위해 측정된 신호에 CLEAN 알고리듬 [11]을 적용하여 직접경로 신호의 ray를 추출한 뒤, 추출된 ray를 기반으로 (3)에 따라 경로손실 지수

표 2. P400 레이더 측정이 이루어진 위치.
Table 2. Locations where P400 radar measurements were taken.

Experiment location	The number of radar scans
Newton Hall 4th floor side-lobby	591
Nehemiah Hall 2nd floor side-lobby	592
Nehemiah Hall 2nd floor hall	591
Hyeondong Hall 1st floor lobby	592
Hyeondong Hall 1st floor lobby	592
All-nations Hall 3rd floor	597
All-nations Hall 3rd floor	597
All-nations Hall 3rd floor	597

www.dbpia.co.kr

를 구하였다:

$$PL(d) = PL(d_0) + 20\, n_{\mathrm{PL}} \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right). \quad (3)$$

기준 거리 d_0는 2 m로 설정하였고, $PL(d_0)$는 기준 거리에서 측정한 직접경로 ray의 전력으로 1.486 dB 이다. 경로손실 지수를 나타내는 파라미터 n_{PL}의 값은 1.598 로 얻어졌다.

3.2 고강도 고스트의 통계적 특성

3.2.1 고강도 고스트 ray의 분포

고강도 고스트 ray는 다음의 (4)를 만족하는 ray로 정의 된다:

$$\frac{p_j(t)}{PL(d_j(t))} \geq \theta_r. \quad (4)$$

여기서 $d_j(t)$는 측정 시간 t에서 j번째로 수신된 간접경로 ray의 TOA (time-of-arrival)에 기반하여 계산된 거리를 의미하고, 이 ray의 파워를 $p_j(t)$로 나타내었다. $PL(d_j(t))$는 거리 $d_j(t)$에서의 타겟 ray의 경로손실이다. 고강도 고스트는 (4)에서 정의된 비율이 threshold θ_r을 넘어서는 간접경로 ray로 정의하였고, θ_r은 -1 dB로 설정하였다.

그림 10과 11은 뉴턴홀 4층과 느헤미야홀 2층 복도에서 측정된 radargram을 보여준다. 각 스캔에서 가장 먼저 도착한 신호 성분, 즉 전달지연이 가장 작은

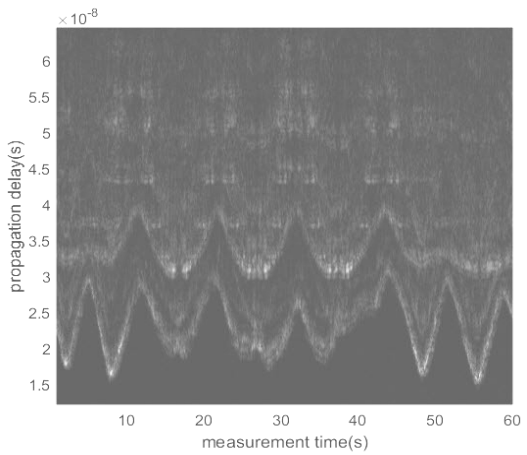

그림 10. 뉴턴홀 4층에서 측정된 radargram.
Fig. 10. Radargram measured at the 4th floor of Newton Hall, Handong Global University.

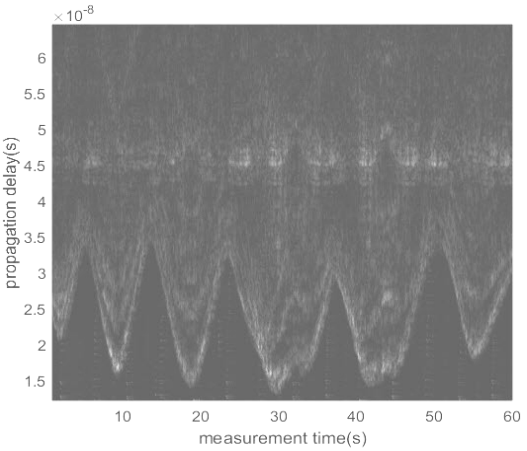

그림 11. 느헤미야홀 2층 복도에서 측정된 radargram.
Fig. 11. Radargram measured at the 2nd floor of Nehemiah Hall, Handong Global University.

신호가 직접경로를 통해 도착한 신호이고, 나머지는 간접경로 신호로 볼 수 있다. 그림에서 직접경로 신호 뿐 아니라, 다수의 고스트 신호가 함께 관찰된다. 고스트 신호의 일부는 직접경로 신호의 시간지연의 궤적과 유사한 궤적을 따라 형성되어 있으며, 일부는 이와는 무관하게 군집화 된 형태로 형성되어 있는 것을 볼 수 있다.

그림 12와 13은 앞서 측정된 radagram에서 (4)에 따라 검출된 고강도 고스트 ray의 초과전력 (excess power)을 나타낸 산점도 (scatter plot)이다. 그림에 나타낸 값은 직접경로 신호의 경로손실을 기준으로 정규화 된 (normalized) 전력 값을 나타낸다. 그림에서 고강도 고스트 ray가 다수 관찰되며, 그림 14는 각 스캔에서 검출된 고강도 고스트 개수의 히스토그램으로

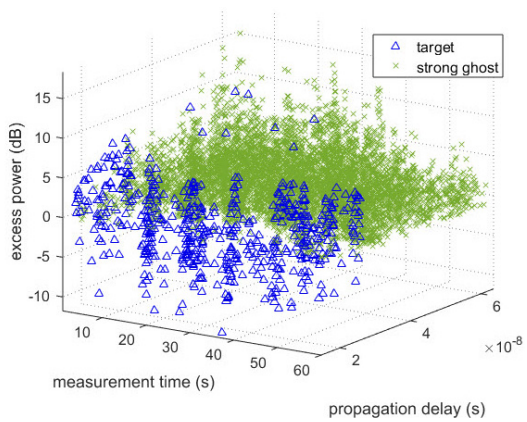

그림 12. 뉴턴홀 4층에서 측정된 ray의 초과전력의 산점도.
Fig. 12. Scatter plot of excess power measured at the 4th floor of Newton Hall, Handong Global University.

www.dbpia.co.kr

평균 9.1 개의 고강도 고스트가 각 스캔에서 검출되었음을 확인할 수 있었다. 그림 15는 측정된 모든 스캔에서 검출된 ray들의 산점도를 보여준다. 그림에서 실선으로 표시된 threshold 이상의 크기를 갖는 ray들이 고강도 고스트 ray로 분류되며, 전달지연이 커질수록 더 많이 발생함을 볼 수 있다.

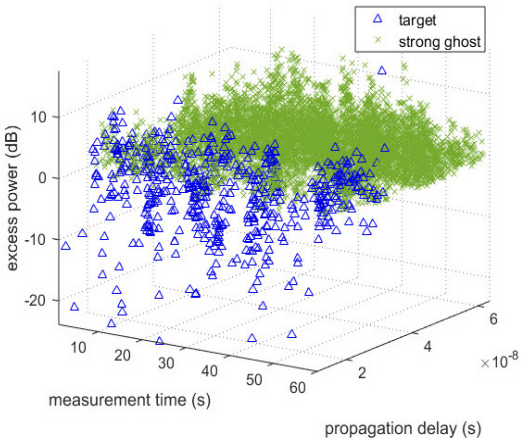

그림 13. 느헤미야홀 2층 복도에서 측정된 ray의 초과전력의 산점도.
Fig. 13. Scatter plot of excess power measured at the 2nd floor of Nehemiah Hall, Handong Global University.

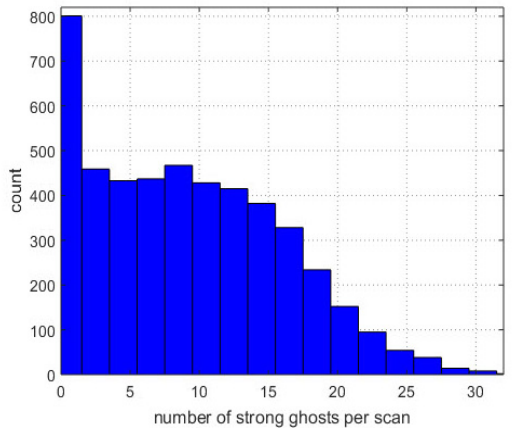

그림 14. 고강도 고스트 ray의 히스토그램.
Fig. 14. Histogram of strong ghost ray.

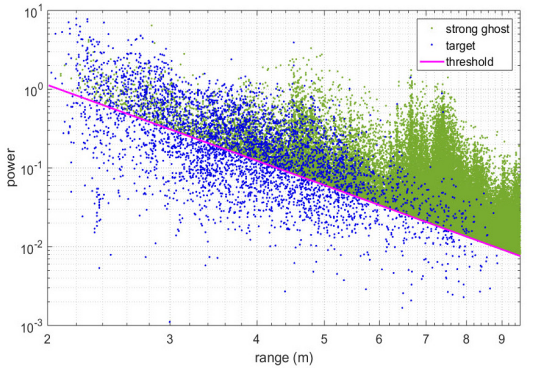

그림 15. 전체 고강도 고스트 ray의 산점도.
Fig. 15. Scatter plot of total strong ghost ray.

3.2.2 지연 확산

본 논문에서는, 논문 [10]에 개시된 바와 같이, 직접경로 및 간접경로 신호 성분들이 클러스터화(clustering) 되어 있다고 가정한다. 각 클러스터의 통계적 특성을 분석하기 위하여, 레이더 스캔으로부터 CLEAN 알고리듬을 이용하여 ray를 검출한 후, 클러스터링 알고리듬을 적용하여 클러스터를 검출하였다.

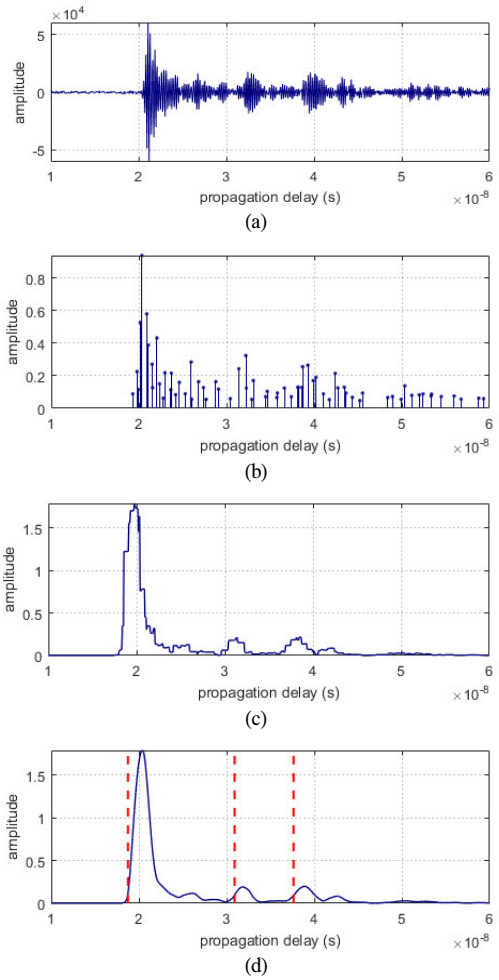

그림 16. 클러스터링 과정. (a) 측정된 레이더 신호, (b) CLEAN 알고리듬으로 얻어진 impulse response, (c) sliding correlator의 output, (d) 저주파 필터 출력.
Fig. 16. Process of cluster identification. (a) measured data, (b) channel impulse response obtained using CLEAN algorithm, (c) output of the sliding correlator, (d) low pass filter output.

www.dbpia.co.kr

UWB 신호의 클러스터링 기법에 대한 연구는 다음과 같이 보고된 바 있고 [12,13], 본 연구에서는 저주파 필터를 이용한 클러스터링을 수행하였으며, 그림 16은 그 과정의 한 예시를 보여준다.

먼저 하나의 레이더 스캔 대하여 CLEAN 알고리즘으로 얻어진 ray의 전력을 3 ns 폭의 구형파 윈도우와 sliding correlation 취하고, 저주파 필터에 통과시킨다. 이때 얻어진 필터의 출력을 $y(\tau)$라고 하면 $y(\tau)$의 크기와 미분 값의 비율이 0.05 이상이 되고, 이전 cluster의 도착시간과의 시간차를 거리로 환산한 값이 20 cm 이상 되는 지점을 새로운 cluster의 시작점으로 선택하였다.

시간 t에 측정된 스캔에 클러스터링 알고리듬을 통해 얻어진 j번째 클러스터의 지연확산은 다음과 같이 계산될 수 있다:

$$\tau_{s,j}(t)=\sqrt{\frac{\int_0^\infty \left(\tau-\bar{\tau}_j(t)\right)^2\gamma_j(\tau;t)d\tau}{\int_0^\infty \gamma_j(\tau;t)d\tau}}. \qquad (5)$$

여기서, $\gamma_j(\tau;t)=\left\{r^2(\tau;t)|\tau_{c,j}\le\tau<\tau_{c,j+1}\right\}$ 는 j번째 클러스터에 해당하는 제곱신호를 의미하고, $\bar{\tau}_j(t)$는 다음과 같이 정의 된다:

$$\bar{\tau}_j(t)=\frac{\int_0^\infty \tau\cdot\gamma_j(\tau;t)d\tau}{\int_0^\infty \gamma_j(\tau;t)d\tau}. \qquad (6)$$

그림 17은 타겟 클러스터와 간접경로 신호가 포함된 클러스터의 지연확산 (delay spread)의 분포를 보여주며, 각각의 평균과 표준편차는 표 3에 정리되어 있다. 고강도 고스트가 포함된 클러스터의 지연확산이 직접경로에 의한 것보다 평균이 3배 이상 크게 나타났으며, 표준편차도 2배 이상 크게 얻어진 것을 확인할 수 있다.

표 3. 타겟 클러스터와 고강도 고스트 클러스터의 지연확산의 평균 및 표준편차.
Table 3. Mean and standard deviation of delay spread of target cluster and strong ghost cluster.

t_{rms}	$\mu(s)$	σ
target cluster	1.6115×10^{-9}	1.4599×10^{-9}
ghost cluster	5.5798×10^{-9}	3.2387×10^{-9}

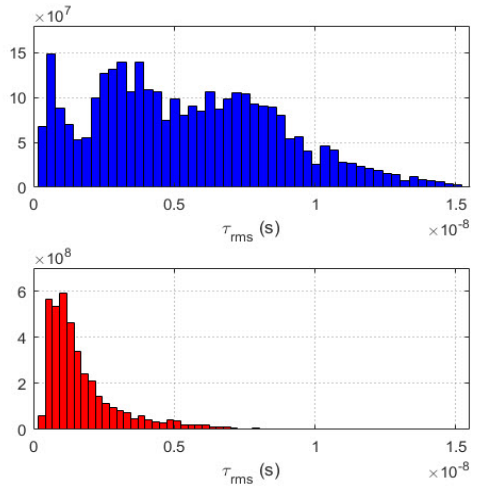

그림 17. 고강도 고스트 클러스터(상)와 타겟 클러스터(하)의 지연 확산의 히스토그램.
Fig. 17. Histograms of delay spread of strong ghost cluster (upper) and target cluster (lower).

3.2.3 주파수 특성

측정 신호의 주파수 특성을 분석하기 위해 시간 영역에서 측정한 신호에 2차원 Fourier transform을 취하여 스펙트럼 특성을 살펴보았다. 전달지연 (τ)과 측정시간 (t)을 각각 0.98 ns와 1.6 s의 해상도로 양자화 (quantization) 하여 2차원 셀을 생성하고, 다음과 같이 2차원 Fourier transform을 적용하였다:

$$R(u,v)=\int_{-\infty}^{\infty} r(\tau;t)e^{-j2\pi(u\tau+vt)}d\tau dt. \qquad (7)$$

그림 18과 19는 직접경로 신호가 포함된 셀 629 개와 고강도 고스트 신호가 포함된 셀 532 개를 취하여 진폭 스펙트럼(magnitude spectrum)을 구한 뒤, 각각의 평균을 취한 결과이다. 그림에서 수평축은 측정시간에 따른 변화의 스펙트럼을, 수직축은 전달지연에 따른 변화의 스펙트럼을 나타낸다. 전달지연에 따른 스펙트럼의 중심 주파수는 직접경로와 고강도 고스트 모두 약 0.26 GHz 로 유사하게 관찰된다. 수직축으로는 두 경우 유사한 스펙트럼이 관찰되는데, 이는 고강도 고스트의 유무에 따라 초광대역 펄스의 파형이 크게 변하지 않기 때문이다. 반면 수평축으로는 두 경우에서 현저히 다른 형태의 스펙트럼을 관찰 할 수 있다. 직접경로 신호의 경우 0.04 Hz에서 0.27 Hz에 걸쳐 고른 스펙트럼이 관찰되는 반면, 간접경로 신호의 경우 0.04 Hz에서 0.08 Hz 대역에 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 타겟의 움직임으로 인한 직접경

www.dbpia.co.kr

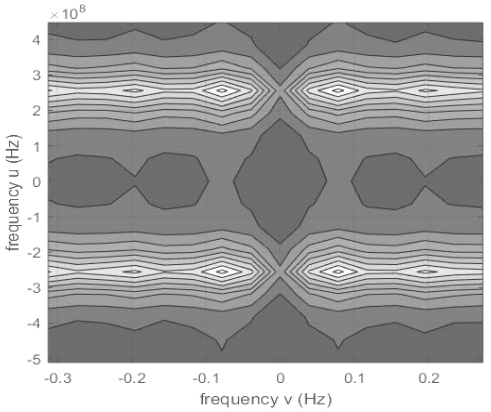

그림 18. 타겟 셀의 진폭 스펙트럼.
Fig. 18. Magnitude spectrum of target cell.

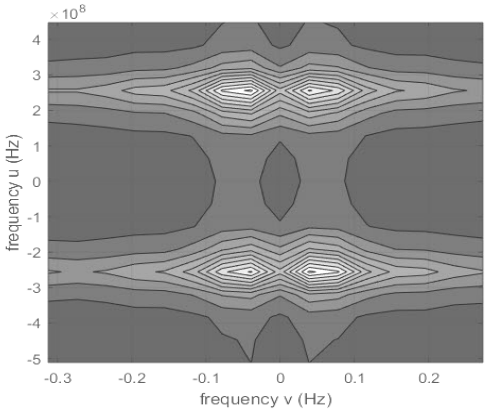

그림 19. 고강도 고스트 셀의 진폭 스펙트럼.
Fig. 19. Magnitude spectrum of strong ghost cell.

로 신호의 변화가 매 측정시간마다 나타나는데 반해, 고강도 고스트 신호의 경우는 측정시간에 따른 변화가 직접경로 신호에 비해 훨씬 느리다는 것을 의미한다. 군집화 된 형태로 나타나는 일부 고강도 고스트의 경우는 타겟의 움직임이 반영되지 않기에 이러한 특성이 관측되는 것으로 보여진다.

이 현상을 보다 명확히 관찰하기 위하여, 한동대학교 현동홀 1층 로비에서 별도의 측정을 진행하였으며, 그림 20은 측정된 radargram을 보여준다. 전달지연 값을 고정하고 측정시간을 T_{Q} s로 양자화하여 short-time Fourier transform (STFT)을 적용하였다. 전달지연이 τ 일 때, m번째 구간에 해당하는 신호 $x_m(\tau;t)$는

$$x_m(\tau;t)=\begin{cases} r(\tau;t), & t\in\left((m-1)T_{\mathrm{Q}}, mT_{\mathrm{Q}}\right], \\ 0, & \text{otherwise}, \end{cases} \tag{8}$$

으로 정의되며, 이에 해당하는 STFT은

$$X_m(\tau;v)=\int_{-\infty}^{\infty} x_m(\tau;t)e^{-j2\pi vt}dt\,, \tag{9}$$

로 얻어진다. 그리고 $X_m(\tau;f)$로부터 평균 주파수 μ_m을 다음과 같이 계산하였다:

$$\mu_m=\int_{-\infty}^{\infty}|v|\cdot g_m(\tau;v)dv\quad. \tag{10}$$

여기서 함수 $g_m(\tau;v)$는

$$g_m(\tau;v)=\frac{|X_m(\tau;v)|^2}{\int_{-\infty}^{\infty}|X_m(\tau;v)|^2dv}, \tag{11}$$

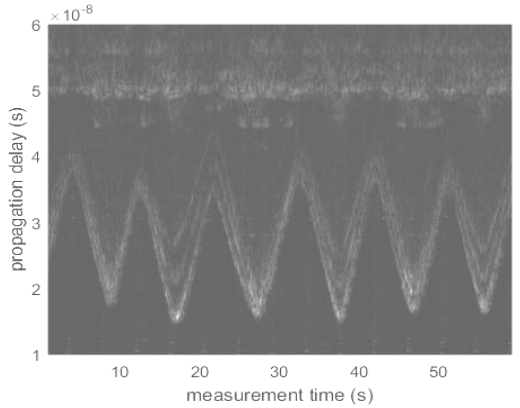

그림 20. 현동홀 1층 로비에서 측정된 radargram.
Fig. 20. Radargram measured at the lobby of Hyeondong Hall, Handong Global University.

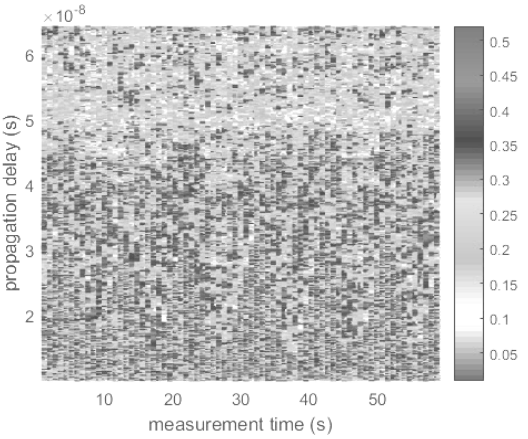

그림 21. STFT으로 얻어진 스펙트럼의 평균 주파수.
Fig. 21. Mean frequency of spectrum obtained using STFT.

www.dbpia.co.kr

으로 정의되며, 일종의 확률밀도함수의 역할을 한다. 그림 21은 그림 20에 나타낸 신호를 측정시간에 대해 $T_Q = 0.8$ s로 STFT을 적용한 뒤, 평균 주파수 (mean frequency) μ_m을 구하여 plot한 결과이다. 그림에서 고강도 고스트가 분포해있는 영역에서 μ_m의 값이 확연히 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 직접경로 신호 부근의 영역과 고강도 고스트 부근 영역에서의 μ_m 값의 평균을 구했을 때, 각각 0.2418 Hz와 0.1393 Hz로 얻어졌고, 특정 고강도 고스트의 경우 측정 시간에 따른 변화가 타겟이 움직이는 속도에 비해 현저히 느리게 변화하는 현상을 확인할 수 있었다.

Ⅳ. 2D Tracking 예제

본 절에서는 고강도 고스트가 실제 타겟 추적 시나리오에서 그 정확도에 얼마나 영향을 주는지 확인하고자 한다. 일반적으로 하나의 타겟만 존재한다는 가정 하에 타겟의 위치를 추적할 경우, 3개의 모노스태틱 레이더에서 측정된 신호 성분 중 직접경로 신호만을 이용해 2차원 상의 좌표를 계산할 수 있다. 그러나 다수의 타겟이 움직이는 경우, 측정된 레이더 스캔에서 가장 먼저 도달한 직접경로 신호 이외에 또 다른 직접경로 신호 성분이 있는지를 확인하는 작업이 필요하다.

실내 환경에서 직접경로 신호와 유사한 강도를 갖는 고강도 고스트는 지연확산의 평균값이 타겟에 비해 3배 이상 크게 나타나는 것을 확인했지만, 그림 17에서 볼 수 있듯이 타겟과 유사한 지연확산을 갖는 경우도 존재한다. 또한, 타겟의 움직임과 무관하게 군집화 된 형태로 형성되는 고강도 고스트의 경우 주파수 영역에서 구별되는 특성을 확인하였으나, 직접경로 신호의 시간 지연 궤적과 유사한 궤적을 따라 형성되는 고스트의 경우 이를 구분하는 것이 쉽지 않다. 생성된 고강도 고스트는 실내 위치 추적 과정에서 또 다른 타겟으로 분류되고, 이는 타겟 위치 추적의 정확도를 현저히 저하시킨다. 이러한 문제를 확인하기 위하여 2차원 상에서 움직이는 1명의 사람을 추적하는 실험을 진행하였고, 다수의 타겟 추적에 활용되는 다중검정기법 (Multiple Hypothesis Tracking, MHT)으로 타겟의 위치를 추적하였다 [14].

그림 22는 MHT의 흐름도를 보여준다. 추적 과정에서 새로운 측정 값(좌표)이 입력되면, 해당 값이 기존에 트랙(track) 에 포함되는지를 확인하는 Gating 과정을 거치고, 그 결과에 따라 입력된 측정값을 이용

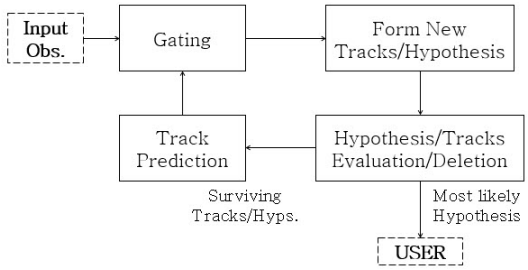

그림 22. MHT 흐름도.
Fig. 22. Flow chart of MHT.

해 새로운 트랙을 형성하거나 기존 트랙에 포함 시킨다. 입력 값을 처리하고 나면, 현재 생성되어 있는 트랙을 타겟 트랙으로 확정할 것인지 아니면 잠정적으로 형성된 트랙으로 판단할 것인지 결정한 후, 현재 생성되어 있는 트랙의 제거 여부를 결정한다. 이후, 남아있는 트랙에 대해 다음에 들어올 입력 값을 예측하여 Gating 함수를 새롭게 정의한다.

MHT 수행을 위하여 우선 2차원 상에서 단일 스캔 기반(single scan basis)으로 타겟의 좌표를 추정할 필요가 있다. 그 이후 입력 좌표는 Gating 함수에 의해 트랙에 포함시킬지 여부가 결정된다. Gating 함수는 이전에 트랙에 포함된 값을 토대로 현재의 좌표가 해당 트랙에 포함될 것인지를 판단하기 위해 사용되고, 2차원 선형 칼만 필터 (Kalman Filter)를 이용해 정의하였다. 칼만 필터에서의 상태 모델과 측정 모델은 (12)와 (13)에 의해 표현된다.

$$\bar{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + w_k. \tag{12}$$

$$z_k = Hx_k + v_k. \tag{13}$$

식에서 $\hat{x}_{k-1}$은 이전 시점에서 추정한 2차원 좌표의 위치와 속도 값을 갖고 있는 4×1 벡터이고, $\bar{x}_k$는 이전추정 값과 상태전이행렬 A를 이용해서 새롭게 예측한 벡터이다. (13)식에서 x_k는 현재 시점에 측정한 입력 좌표이고, 측정행렬 H를 이용해서 칼만 필터에서 사용할 측정 변수 z_k를 생성한다. 상태 모델의 잡음에 해당하는 w_k는 평균이 0이고, 공분산 Q를 갖는 백색 잡음 (white Gaussian noise)으로 가정하고, 측정 모델의 잡음 v_k 또한 평균이 0이고, 공분산 R을 갖는 백색잡음으로 가정하였다.

2차원 칼만 필터에서는 현재 시점의 예측 값($\bar{x}_k$)과 (14)에 정의된 y_k값에 칼만 계수를 이용해 가중치를

www.dbpia.co.kr

주어 다음 시점의 좌표를 추정하고, 칼만 필터의 추정 값에 대한 오차의 공분산 P_k를 수정하는 과정을 반복적으로 수행한다.

$$y_k = z_k - H\bar{x}_k. \tag{14}$$

입력 값이 트랙에 포함되는지를 확인하는 Gating 함수는 (15)에 정리한 y_k의 공분산 S_k를 이용해 정의할 수 있다. 현재 시점의 입력 값 z_k를 이용해 (16)과 같이 D_k를 정의하고, (17)의 조건을 이용하여 입력 값 z_k가 트랙에 포함되는지 여부를 판단 한다 [15].

$$S_k = H\bar{P}_k H + R, \tag{15}$$

$$D_k(z_k) = (z_k - H\bar{x}_k)^T S_k^{-1}(z_k - H\bar{x}_k), \tag{16}$$

$$R_\gamma = [z_m : D_k(z_k) \le \gamma]. \tag{17}$$

칼만 필터와 Gating 함수에 사용된 파라미터는 표 4에 정리하였고, 공분산 P의 초기 값은 4×4 항등행렬 (identity matrix)로 설정하였다.

다수의 입력 좌표가 하나의 트랙의 Gating 함수에 포함될 경우는, NN(nearest neighbor) 기법을 이용하여 $D_k(z_k)$값이 제일 작은 좌표를 트랙에 포함시켰다 [16]. 트랙이 처음 형성되면 해당 트랙은 잠정 트랙으로 분류되고, 이후에 트랙에 포함되는 좌표에 따라서 트랙을 제거할지 또는 확정 트랙으로 전환할지 결정하게 되는데, 트랙의 상태를 결정하는 간단한 규칙은 마지막으로 입력된 최근 N개의 좌표 중에서 M개 이상의 좌표가 트랙에 포함되었는지를 확인하는 것이다 [14]. 본 실험 과정에서는 잠정 트랙의 경우 가장 최근에 입력된 5개의 좌표 중 5개의 좌표 모두가 트랙에 포함될 경우 이를 확정 트랙으로 전환하였고, 입력된 5개의 좌표 중 4개 이하의 좌표가 잠정 트랙에 포함되는 경우에는 트랙의 제거 및 확정 여부를 보류한다. 잠정 트랙의 제거는 가장 최근에 입력된 5개의 좌표 중 트랙에 포함되는 좌표가 2개 이하가 되는 경우에 이뤄지고, 확정 트랙의 경우는 최근 11개의 입력 좌표 중 2개 이하의 좌표가 트랙에 포함되는 경우에 제거된다.

표 4. 칼만 필터 및 Gating 함수 파라미터.
Table 4. Kalman filter and Gating function parameters.

Kalman Filter, Gating Function Parameter	
state transition matrix	$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
measurement matrix	$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
covariance of state noise	$Q = Q_k \begin{bmatrix} \frac{1}{3}\Delta t^3 & \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}\Delta t^2 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}\Delta t^3 & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 & \Delta t \end{bmatrix}$
covariance of meas.noise	$R = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.04 \\ 0.04 & 0.2 \end{bmatrix}$
Gating parameter and Q_k	$Q_k = 0.5,\ \gamma = 0.75$

그림 23에는 2차원 추적 실험에서 측정된 좌표를, 그림 24에는 측정된 2차원 좌표를 이용해 MHT로 추정한 트랙을 나타내었다. 2차원 좌표를 생성하는 data association 과정에서는 삼각측량법을 이용해 MSE (minimum square error) 값이 최소가 되도록 하는 지점을 좌표로 계산하였다. 그 결과, 603개의 관찰된 좌표 중에서 26.87%에 해당하는 162개의 좌표가 고강도 고스트에 의해 생성되었음을 확인하였고, 이로 인해 그림 24에서 볼 수 있듯이 고스트 트랙이 발생함을 확인하였다. 일반적인 MHT 과정은 주어진 입력 좌표가 제대로 측정되었음을 가정한 상태에서 다수의 타겟을 추적하기 위한 기법이기 때문에, 고강도 고스트

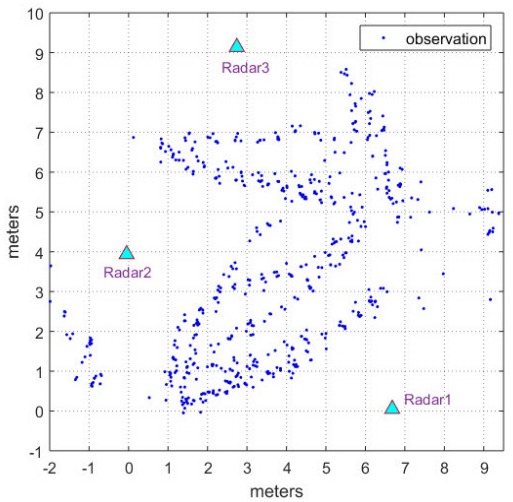

그림 23. MHT 입력 (관측 좌표).
Fig. 23. MHT input (observations).

www.dbpia.co.kr

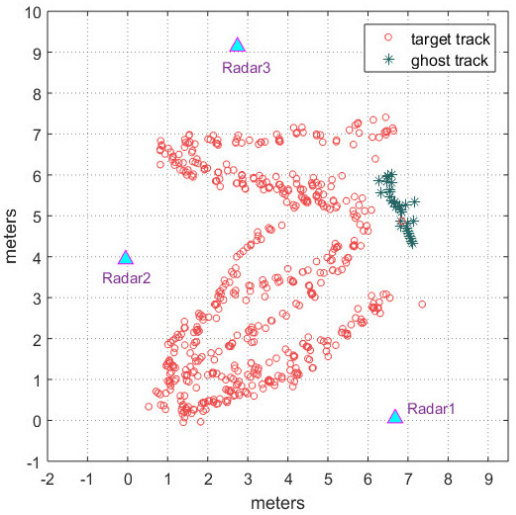

그림 24. 2차원 타겟 추적 예시.
Fig. 24. 2D target tracking example.

에 의해 잘못 생성된 입력 좌표로 인한 오류는 MHT 단계에서 보정되지 않는다. 따라서 이러한 오류는 MHT 과정에서 사용되는 추적 알고리듬이나, 칼만 필터의 성능, 또는 Gating 함수의 특성에 무관하게 존재하기 때문에 실내 위치 추적과정에 지대한 영향을 미치게 된다.

V. 결 론

본 논문에서는 실내 위치 추적 과정에서 발생하는 고강도 고스트의 발생 원인과 특성에 대해 소개하였다. 직접경로 신호의 경로손실을 기준으로 정의한 고강도 고스트는 주로 대칭 간접경로 신호와 차단산란 신호에 의해 생성되는 것으로 나타났다. 고강도 고스트가 포함된 클러스터는 타켓 클러스터에 비해 큰 지연확산을 갖는 것을 확인하였으며, 또한 측정시간에 따른 움직임이 느린 것으로 나타났다. 이러한 고강도 고스트는 강한 전력으로 인해 실제 위치추적 시나리오에서 주요한 오류를 발생시킴을 확인할 수 있었다.

References

[1] H. M. Khoury and V. R. Kamat, "Evaluation of position tracking technologies for user localization in indoor construction environment," *Automation in Construction*, vol. 18, pp. 444-457, 2009.

[2] S. Bartoletti, A. Conti, A. Giorgetti, and M. Z. Win, "Sensor radar networks for indoor tracking," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 152-160, Apr. 2014.

[3] Tan N. Lee, Jae-Woon Kim, and Yo-An Shin "An Improved TDoA localization with particle swarm optimization in UWB systems," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 35, no. 1C, pp. 87-95, Jan. 2010.

[4] J. Shen and A. F. Molisch, "Indirect path detection based on wireless propagation measurements," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 12, pp. 4482-4493, Dec. 2012.

[5] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. AES-19, pp. 608-621, Jul. 1983.

[6] S. Blake, "OS-CFAR theory for multiple targets and nonuniform clutter," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 26, pp. 785-790, Nov. 1988.

[7] S.-J. Shin, "A study of efficient CFAR algorithm," *The J. Inst. Electromagnetic Eng. and Sci.*, vol. 25, no. 8, pp. 849-856, Aug. 2014.

[8] F. Folster, H. Rohling, and U. Lubbert, "An automotive radar network based on 77 GHz FMCW sensors," *2005 IEEE Int. Radar Conf.*, Arlingon, VA, USA, May 2005.

[9] F. Folster and H. Rohling, "Data association and tracking for automotive radar networks," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 6, pp. 370-377, Dec. 2005.

[10] M. Lee and J.-Y. Lee, "Statistical modeling of indirect paths for UWB sensors in an indoor environment," *Sensors*, vol. 17, no. 1, pp. 1-16, Dec. 2016.

[11] J. M. Cramer, R. A. Scholtz, and M. Z. Win, "Evaluation of an ultra-wideband propagation channel," *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, vol. 50, no. 5, pp. 561-570, May 2002.

[12] O. H. Woon and S. Krishnan, "Identification of clusters in UWB channel modeling," *Veh. Technol. Conf.*, pp. 1090-3038, Montreal,

www.dbpia.co.kr

Canada, Sept. 2006.

[13] M. Corrigan, A. Walton, W. Niu, and J. Li "Automatic UWB clusters identification," *Radio and Wireless Symp.*, pp. 376-379, San Diego, USA, Jan. 2009.

[14] S. S. Blackman, "Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking," *IEEE Aerospace and Electron. Syst. Mag.*, vol. 19, no. 1, pp. 5-18, Jan. 2004.

[15] D. B. Reid, "An algorithm for tracking multiple targets," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 24, pp. 843-854, Dec. 1979.

[16] X. R. Li and Y. Bar-Shalom, "Tracking in clutter with nearest neighbor filters: analysis and performance," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 32, pp. 995-1010, Jul. 1996.

김 대 웅 (Dae-Woong Kim)

2017년 2월 : 한동대학교 전산자공학부 전자공학심화 졸업

2017년 3월~현재 : 한동대학교 정보통신공학과 석사과정

<관심분야> UWB 위치추적시스템

이 준 용 (Joon-Yong Lee)

1993년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 학사 졸업

1997년 5월 : University of Southern California 전자공학과 석사 졸업

2002년 5월 : University of Southern California 전자공학과 박사 졸업

2002년 9월~현재 : 한동대학교 전산전자공학부 교수

<관심분야> UWB 위치추적시스템, UWB 레이더 센서 네트워크, UWB 채널 모델링

www.dbpia.co.kr