상관값 누적 기반 DS-UWB 레이더 시스템

이 영 포*, 윤 석 호*, 이 성 로°

A DS-UWB Radar System Based on Correlation Accumulation

Youngpo Lee*, Seokho Yoon*, Seong Ro Lee°

요 약

본 논문에서는 선박 접안 유도 시스템 등 정밀한 거리 추정을 요하는 안전항해운항, 선박트래픽관리 등의 분야에 알맞은 상관값 누적 기반 직접 수열 초광대역 (direct sequence ultra wideband: DS-UWB) 레이더 시스템을 제안한다. 제안하는 DS-UWB 레이더 시스템은 상관기 출력들을 누적하여 잡음을 평균냄으로써 잡음 성분의 영향을 줄이며, 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들에 비해 더 빠른 시간에 신뢰성 있는 거리 추정을 수행한다. 모의실험 결과를 통해 제안하는 DS-UWB 레이더 시스템이 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들에 비해 평균 상관 처리 시간이 더 짧을 뿐 아니라, 더 좋은 거리 추정 성능을 보임을 확인한다.

Key Words : DS-UWB, radar, docking guidance system, correlation accumulation

ABSTRACT

In this paper, we propose a direct sequence ultra wideband (DS-UWB) radar system based on correlation accumulation in the fields of the ship traffic control and the safe ship operation including docking guidance systems. The proposed DS-UWB radar system averages out the noise by accumulating correlator outputs, and thus, provides a reliable distance estimation performance with a shorter estimation time compared with conventional DS-UWB radar systems. From numerical results, it is confirmed that the proposed DS-UWB radar system has not only a shorter average correlation processing time, but also a better distance estimation performance.

I. 서 론

직접 수열 초광대역 (direct sequence ultra wideband: DS-UWB) 레이더는 높은 시간 분해능을 가지기에 차량 레이더, 보안 센서 등의 거리 추정 기기에 널리 이용되고 있다^[1,2]. 최근에는 UWB 기반 레이더를 선박 접안 유도 시스템에 적용하는 등 정밀한 거리 추정을 요하는 안전항해운항, 선박트래픽관리 등의 분야에서 이용하는 것에 대한 연구가 활발히 진행

되고 있다^[3]. DS-UWB 레이더에서는 의사잡음 (pseudo noise: PN) 수열을 사용하며, PN 수열의 길이가 길수록 더 높은 상관 이득을 얻을 수 있어 보다 신뢰성 있는 거리 추정을 수행할 수 있다. 그러나 긴 PN 수열을 이용하기 위해서는 긴 상관 처리 시간이 (correlation processing time) 필요하며^[4], 선박과 장애물 간의 충돌을 피하기 위해 빠른 거리 추정을 수행해야 하는 선박 접안 등의 분야에는 적합하지 않다. 최근에는 다양한 길이의 PN 수열들을 이용하는 기

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0301-13-1005)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0029321)

• 주저자 : 성균관대학교 정보통신대학, leeyp204@skku.edu, 학생회원

° 교신저자 : 목포대학교 정보전자공학과, srlee@mokpo.ac.kr, 정회원

* 성균관대학교 정보통신대학, syoon@skku.edu, 중신회원

논문번호 : KICS2013-01-025, 접수일자 : 2013년 1월 14일, 최종논문접수일자 : 2013년 3월 8일

법들이 [5]-[6]에서 제안되어 왔으며, 한 개의 긴 길이 PN 수열을 이용하는 대신 여러 개의 다양한 길이 PN 수열들을 거리 추정치의 표준 편차에 따라 선택하는 방식을 채용함으로써 추정 성능은 유지하면서도 상관 처리 시간을 줄였다. 그럼에도 불구하고 기존의 기법들은 낮은 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) 환경에서는 거리 추정치의 표준 편차가 크기에 성능 유지를 위해서는 긴 길이의 PN 수열을 사용해야 하며, 여전히 상관 처리 시간이 길다는 문제가 있다.

본 논문에서는 상관값 누적에 기반한 새로운 DS-UWB 레이더 시스템을 제안한다. 각 상관값의 잡음 성분들은 독립적이라고 가정될 수 있으므로, 누적을 통해 잡음을 평균냄으로써 잡음 성분의 영향을 줄일 수 있으며, 이를 통해 낮은 SNR 환경에서도 긴 길이의 PN 수열을 이용하지 않고, 한 개의 짧은 길이 PN 수열만을 이용하여 상관 처리 시간을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 한 개의 짧은 길이 PN 수열을 채용하여, 상관값을 누적한 후 거리를 추정함으로써 기존 기법들보다 상관 처리 시간이 짧은 DS-UWB 레이더 시스템을 제안하며, 모의실험을 통해 제안한 기법이 기존의 기법들에 비해 상관 처리 시간이 더 짧을 뿐 아니라 누적 횟수를 늘림에 따라 더 좋은 root mean square error (RMSE) 성능을 가짐을 확인한다.

이후 이 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 DS-UWB 레이더 시스템의 구조와 제안하는 DS-UWB 레이더 시스템을 설명한다. III장에서는 제안한 시스템과 기존의 시스템에 대한 평균 상관 처리 시간 및 RMSE 성능을 모의실험한 결과를 비교하며, 마지막으로 IV장에서 이 논문의 결론을 내린다.

II. 제안한 DS-UWB 레이더 시스템

DS-UWB 레이더는 UWB 펄스에 의사잡음부호를 곱한 형태의 DS-UWB 신호를 이용하여 거리를 측정한다. 그 시스템의 형태는 그림 1에서 나타내는 바와 같다. DS-UWB 레이더는 하나의 장비에서 신호를 송신하고 물체에 반사되어 들어온 신호와의 시간 차이를 이용하여 물체와의 거리 D 를 측정한다. DS-UWB 신호는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \sqrt{E_c} \sum_{j=0}^{N-1} p_j g(t - jT_c), \quad (1)$$

여기서 N 과 E_c 는 각각 PN 수열의 주기와 칩(chip) 에너지를 나타내고, p_j 는 ($p_j \in \{-1, 1\}$) j 번째 칩, T_c 는 칩 구간을 나타내며, $g(t)$ 는 $[0, T_c]$

그림 1. DS-UWB 레이더 시스템 블록도.
Fig. 1. Block diagram of DS-UWB radar systems.

구간에서 1의 에너지를 갖는 UWB 펄스 파형으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$g(t) = \left[1 - 4\pi \left(\frac{t - T_c/2}{\gamma} \right)^2 \right] \exp \left[-2\pi \left(\frac{t - T_c/2}{\gamma} \right)^2 \right], \quad (2)$$

여기서 γ 는 시간 정규화 인자로서 칩 구간 내에 전체 펄스 에너지의 99.99%가 포함될 수 있도록 설정되었으며 그 값은 $\sqrt{4\pi/7}T_c$ 이다^[7]. DS-UWB 신호 $s(t)$ 는 물체에 반사되어 시간 지연 τ 이후 레이더로 돌아오며, 수신 신호 $r(t)$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = s(t - \tau) + w(t), \quad (3)$$

여기서 $w(t)$ 는 평균이 0이고, 전력 밀도가 $N_0/2$ 인 덧셈꼴 백색 가우스 잡음 (additive white Gaussian noise: AWGN) 과정이다. 오류 없이 시간 지연 τ 를 추정한다면, 레이더와 물체와의 거리는 $c\tau/2$ 로 계산되며, 여기서 c 는 빛의 속도를 나타낸다. 시간 지연 τ 를 추정하기 위하여 상관기에서는 국소(local) 신호인 $s(t - \tilde{\tau})$ 와 수신 신호와의 상관을 구한다. 여기서 $\tilde{\tau}$ 는 시간 지연에 대한 후보값으로 $\Delta = \{0, T_c, 2T_c, \dots, (N-1)T_c\}$ 중 하나의 값으로 설정된다. 이를 통해 구한 m 번째 상관값 $R_m(\tau, \tilde{\tau})$ 은 $m = 1, 2, \dots, M$ 에 대하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_m(\tau, \tilde{\tau}) = \int_{(m-1)NT_c}^{mNT_c} r(t)s(t - \tilde{\tau})dt \quad (4)$$

$$= E_c S(\tau, \tilde{\tau}) + W_m$$

여기서 M 은 상관 개수를 나타내고, $S(\tau, \tilde{\tau})$ 는 $g(t)$

그림 2. 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들의 추정기 구조.
Fig. 2. The structure of estimator in conventional DS-UWB radar systems.

의 자기상관함수로서 아래와 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$S(\tau, \tilde{\tau}) = \begin{cases} \left[1 - 4\pi \left(\frac{\tilde{\tau} - \tau}{\gamma} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} \left(\frac{\tilde{\tau} - \tau}{\gamma} \right)^2 \right] e^{-\pi \left(\frac{\tilde{\tau} - \tau}{\gamma} \right)^2} & \text{for } |\tilde{\tau} - \tau| \leq T_c \\ 1 & \text{for } |\tilde{\tau} - \tau| > T_c \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $\{W_m\}_{m=1}^M$ 은 평균이 0이고 분산이 $NT_c N_0/2$ 인 독립적이고 동일한 분포를 가지는 가우시안 랜덤 변수이다. 마지막으로 추정기는 $\{R_m(\tau, \tilde{\tau})\}_{m=1}^M$ 을 이용하여 거리 추정치 $\hat{D}$ 을 구한다.

그림 2에서는 기존 DS-UWB 레이더 시스템의 추정기 구조를 나타낸다. 기존의 레이더 시스템에서는 $\{R_m(\tau, \tilde{\tau})\}_{m=1}^M$ 를 개별적으로 사용하여 $\hat{\tau}_m = \arg \max_{\tilde{\tau} \in \Delta} \{R_m(\tau, \tilde{\tau})\}$ 연산을 통해 시간 지연에 대한 추정치들 $\{\hat{\tau}_m\}_{m=1}^M$ 를 구하고, 이를 이용하여 M 개의 거리 추정치들 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M = \{c\hat{\tau}_m/2\}_{m=1}^M$ 을 구한다. 최종적으로는 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M$ 의 평균을 취한 후 거리 추정치인 $\hat{D}_c$ 를 구한다. 추가적으로 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M$ 의 표준 편차를 구하여 PN 수열의 길이를 선택한다.

그림 3은 제안하는 DS-UWB 레이더 시스템의 추정기 구조를 나타낸다. 제안하는 DS-UWB 레이더는 기존의 레이더 시스템들과 달리 상관값들을 누적하여 하나의 시간 지연 추정치 $\hat{\tau}$ 와 하나의 거리 추정치 $\hat{D}_p$ 만을 연산한다. 구체적으로는 M 개의

그림 3. 제안한 DS-UWB 레이더 시스템의 추정기 구조.
Fig. 3. The structure of estimator in the proposed DS-UWB radar system.

상관값들 $\{R_m(\tau, \tilde{\tau})\}_{m=1}^M$ 을 아래와 같이 누적하여 누적된 상관함수 $R(\tau, \tilde{\tau})$ 을 생성한다.

$$R(\tau, \tilde{\tau}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M R_m(\tau, \tilde{\tau}). \quad (6)$$

제안한 DS-UWB 레이더 시스템은 $\hat{\tau} = \arg \max_{\tilde{\tau} \in \Delta} \{R(\tau, \tilde{\tau})\}$ 연산을 통해 시간 지연 추정치 $\hat{\tau}$ 를 구한 후, $\hat{D}_p = c\hat{\tau}/2$ 연산을 통해 거리 추정치를 구한다. $R(\tau, \tilde{\tau})$ 은 $R_m(\tau, \tilde{\tau})$ 에 비하여 $1/M$ 의 잡음 분산을 가지며, 이를 통해 동일한 길이의 PN 수열이 적용되는 경우에는 제안한 DS-UWB 레이더 시스템이 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들에 비해 더 좋은 거리 추정 성능을 가질 것으로 기대할 수 있다. 즉, 기존의 DS-UWB 레이더 시스템은 거리 측정을 위해 개별적인 거리 추정을 반복한 후, 그 평균을 최종 거리 추정치로 이용하기 때문에 개별적인 거리 추정이 어려운 환경에서 거리 측정의 정확도가 떨어지는 문제가 있으나, 제안한 시스템은 상관값의 누적을 통해 이를 극복한다.

III. 모의실험 결과

본 장에서는 기존의 DS-UWB 레이더 시스템과 제안한 DS-UWB 레이더 시스템의 평균 상관 처리 시간 (average correlation processing time: ACPT) 및 RMSE 성능을 비교한다. ACPT는 거리 추정치 $\hat{D}$ 을 구하기 위해 소요되는 평균적인 시간을 의미하고, RMSE는 $\sqrt{E[(D - \hat{D})^2]}$ 이며, 여기서 $E[\cdot]$ 는

그림 4. PN 수열 길이에 따른 제안한 DS-UWB 레이더 시스템의 RMSE 성능
Fig. 4. RMSE performances of the proposed DS-UWB radar system with PN sequences with various length

그림 6. 제안한 DS-UWB 레이더 시스템과 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들의 RMSE 성능
Fig. 6. RMSE performances of proposed and conventional DS-UWB radar systems

그림 5. 제안한 DS-UWB 레이더 시스템과 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들의 ACPT 성능
Fig. 5. ACPT performances of proposed and conventional DS-UWB radar systems

통계적 기댓값을 나타낸다. 모의실험을 위해 다음과 같은 파라미터들을 고려한다. $D=30$ meter, $M=100$, $N=7, 15, 31, 63, 127$ chip. 또한, 기존 DS-UWB 레이더의 최적 성능과 성능을 비교하기 위하여 모의실험을 통해 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M$ 의 표준 편차에 대한 최적 기준값을 구하여 적용하였다.

우선 제안한 DS-UWB 레이더 시스템에 대하여 PN 수열 길이에 따른 RMSE 성능을 그림 4에서 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 사용하는 PN 수열의 길이가 길수록 RMSE 성능이 더욱 향상되는 것을 알 수 있다. 그러나 긴 길이의 PN 수열을 사용할수록 ACPT가 커지기 때문에 적절한 길

이의 PN 수열 길이를 설정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 기존의 DS-UWB 레이더와 RMSE 및 ACPT 성능을 비교하고, 적절한 PN 수열 길이를 설정하는 것에 대한 예시를 제시하였다.

그림 5와 6은 각각 제안한 DS-UWB 시스템과 기존의 DS-UWB 시스템들의 ACPT 및 RMSE 성능을 나타낸다. 기존의 시스템들은 다양한 길이의 PN 수열을 사용하는데 비해 제안한 시스템은 하나의 PN 수열만을 이용하기 때문에 그림 5에서 ACPT 값이 SNR인 E_c/N_0 에 상관없이 상수로 나타난다. 그림 5와 6으로부터 15 칩 길이의 PN 수열을 채용한 제안한 시스템은 관심 SNR 영역인 -20 dB ~ 0 dB E_c/N_0 영역에서 기존의 시스템들에 비해 ACPT가 작을 뿐 아니라, 더욱 우수한 RMSE 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 기존의 시스템은 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M$ 의 표준 편차가 클 때는 127 칩의 긴 PN 수열을 사용함에도 불구하고 짧은 15 칩 길이의 PN 수열만을 이용하는 제안하는 시스템에 비해 더 나쁜 성능을 보인다. 이러한 성능의 차이는 기존의 시스템들은 각각의 개별 상관값들로부터 거리 추정치들을 얻어 평균을 내지만, 제안한 시스템은 상관값들을 누적하여 잡음 성분들의 영향을 줄여 거리 추정치를 얻는 구조적인 차이로부터 기인한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 짧은 상관 처리 시간을 가지는 DS-UWB 레이더 시스템을 제안하였다. 기존의

DS-UWB 레이더 시스템들은 개별적인 상관기 출력값들을 이용해서 개별적인 거리 추정치들을 획득하였으나, 제안한 DS-UWB 시스템은 상관기 출력들을 누적하여 잡음을 평균냄으로써 잡음 성분의 영향을 줄였다. 모의실험 결과를 통해 제안한 DS-UWB 레이더 시스템은 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들에 비해 ACPT가 더 작을 뿐 아니라, 더 좋은 RMSE 성능을 보임을 확인하였다.

References

- [1] M. G. M. Hussain, "Ultra-wideband impulse radar: An overview of the principles," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 13, no. 9, pp. 9-14, Sep. 1998.
- [2] I. Y. Immoreev, S. Samkov, and T.-H. Tao, "Short-distance ultrawideband radars," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 20, no. 6, pp. 9-14, June 2005.
- [3] D. S. Shin, S. R. Lee, I. Oh, and M. A. Jung, "Implementation of testbed of guidance system for docking of ship using location based UWB sensor," *J. KICS*, vol. 35, no. 9, pp. 1314-1321, Sep. 2010.
- [4] S. J. Xu, Y. Chen, and P. Zhang, "Integrated radar and communication based on DS-UWB," in *Proc. Int. Conf. Ultrawideband Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*, pp. 142-144, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2006.
- [5] Y. Nakayama and R. Kohno, "Novel variable spreading sequence length system for improving the processing speed of DS-UWB radar," in *Proc. Int. Conf. Intell. Transport Syst. Telecommun. (ITST)*, pp. 357-361, Phuket, Thailand, Oct. 2008.
- [6] J. Tsuchiya, M. Hayashi, and R. Kohno, "Platoon characteristics of automatic vehicle speed control for vehicles equipped with DS-UWB radar," in *Proc. Int. Symp. Spread Spectrum Techniques Applicat. (ISSSTA)*, pp. 125-130, Taichung, Taiwan, Oct. 2010.
- [7] H. Chen, T. A. Gulliver, W. Li, and H. Zhang, "Performance of ultra-wideband communication systems using DS-SS PPM with BCH coding over a fading channel," in

Proc. Military Commun. Conf. (MILCOM), pp. 1-5, Washington, DC, Oct. 2006.

- [8] B. Hu and N. C. Beaulieu "Accurate evaluation of multipleaccess performance in TH-PPM and TH-BPSK UWB systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 10, pp. 1758-1766, Oct. 2004.

이 영 포 (Youngpo Lee)

2008년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 공학사
2010년 2월 성균관대학교 휴대폰학과 공학석사
2010년 3월~현재 성균관대학교 휴대폰학과 박사 과정
2008년 11월 한국통신학회 하

계종합학술발표회 우수논문상 수상

2009년 12월 IEEE Seoul Section Student Paper Contest 대상 수상

2011년 4월 CTRQ 국제학술대회 Best Paper Award 수상

2011년 12월 아이디스 전자신문 대학(원)생 과학기술&IT 논문공모 대제전 최우수상 수상

<관심분야> 통신 이론, 이동통신, 통계학적 신호처리

윤 석 호 (Seokho Yoon)

1997년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학사 (최우등)

1999년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학석사

2002년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학박사

2002년 3월~2002년 6월 MIT

박사후 연구원

2002년 7월~2003년 2월 Harvard University 박사후 연구원

2003년 3월~현재 성균관대학교 정보통신대학 전자전기공학부 전임강사, 조교수, 부교수

2007년 IEEE 준석학회원

2009년 한국통신학회 LG 학술상 수상

2011년 교육과학기술부 우수연구 인증패 수상

2012년 한국통신학회 우수논문상 수상

<관심분야> 통신 이론, 이동통신, 통계학적 신호처리

이 성 로 (Seong Ro Lee)

1987년 2월 고려대학교 전자공
학과 공학사

1990년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학석사

1996년 8월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학박사

1997년 9월~현재 목포대학교

공과대학 정보전자공학과 교수

<관심분야> 디지털통신시스템, 이동 및 위성통신시
스템, USN/텔레미틱스응용분야, 임베디드시스템,
생체인식시스템