

레이더시스템의 등 간격 선형 배열 안테나에서 시간 지연 보상 알고리즘 연구

이민수*

A Study on the Time Delay Compensate Algorithm in Uniform Linear Array Antenna on Radar System

Min-Soo Lee*

요약 본 논문에서는 신호 대 잡음비를 향상시키기 위해서 시간지연을 보상하는 제어 알고리즘을 제안하고, 제안한 제어 알고리즘을 연속파 레이더 방정식에 적용하여 목표물의 정보를 추정한다. 제안한 제어 알고리즘은 신호 대 잡음비를 향상시키기 위해서 수신신호에 가중치를 곱하여 각 배열소자의 출력신호를 향상시킨다. 레이더는 공간상에 신호를 방사하고 불체로부터 반사된 신호를 수신하여 정보를 추출한다. 그러나 무선통신환경에서는 인공 및 자연구조물로 인해서 다중 경로현상이 발생되어 신호의 시간지연이 나타나게 된다. 시간지연은 간섭신호 및 신호왜곡 현상으로 시스템 성능이 저하되어 원하는 정보를 정확히 추정하기 어렵다. 본 연구에서는 등 간격 선형 배열 안테나를 사용하여 수신신호에 가중치로 지연신호를 보상함으로써 목표물의 추정 정보를 향상시킬 수 있다. 모의실험으로 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘과 지연시간이 보상되지 않은 방법에 대해서 성능을 비교 분석하였으며 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘이 원하는 목표물 거리추정 정보가 향상되었음을 입증하였다.

Abstract This paper proposed a control algorithm to compensate the delay time to improve the signal to noise, and the proposed control algorithm estimate the target information to apply the continuous wave radar equation. The proposed control algorithm improves the output signal of each array element by multiplying the weight of the receive signal to the signal to noise ratio. Radar radiate a signal in spatial and the target information is estimated by the echoed signal from the target. But the signal in the wireless communication environment occurs the delay time due to the multipath which appear human and natural structures. It is difficult to accurately estimate the desired information because of the degradation for the system performance due to the interference signal and the signal distortion. The target information can be improved by compensating the delay signal to apply the weight to the received signal by using the uniform linear array antenna. As a simulation result, we show that the performance of the proposed control algorithm and the non-compensated delay time are compared. The proposed control algorithm proved that the target distance estimation information is improved.

Key Words : FMCW Radar, Array Antenna, Signal to Noise, Delay Time, RCS, Weight

1. 서론

레이더는 송신안테나를 이용하여 공간상에 신호를 송신하고 물체로부터 반사된 신호를 수신기에서 관

측하여 원하는 정보(속도, 거리, 각도 등)를 추출한다 [1-2]. 레이더는 일반적으로 펄스 레이더와 연속 파형 레이더로 구분할 수 있다. 펄스 레이더(Pulsed Radar)는 송신과 수신을 같은 안테나로 사용하며 펄

*Division of Human IT Convergence, Daejin University

Received July 21, 2019

Revised August 21, 2019

Accepted August 21, 2019

스 신호를 송신기에서 방사하여 목표물로부터 반사된 신호를 수신하여 지연시간을 측정하여 레이더에서 목표물까지의 거리를 측정한다. 펄스 레이더는 펄스반복주기(PRF:Pulse Repetition Frequency)에 따라서 Low PRF, medium PRF, high PRF로 분류된다[3-4]. Low PRF레이더는 거리추정을 위해서 사용되고, High PRF레이더는 속도를 추정하기 위해서 주로 사용된다. 연속파형(Continuous Wave) 레이더는 송신안테나와 수신안테나를 독립적으로 구성하여 연속적인 파형을 공간상에 방사하여 목표물에 반사되어 돌아오는 시간 동안의 주파수가 변화된 것을 측정하는 방식으로, 일반적으로 도플러 주파수를 이용하면 이동 목표물의 속도를 측정할 수 있다. 비변조된 연속파형 레이더는 각도와 방향을 추정할 수 있지만 목표물의 거리는 추정할 수 없다. 초기 연속파형 레이더는 속도, 트랙, 미사일 유도에 사용되었으며 목표물의 거리를 추정하기 위해서는 변조형태를 활용하여야 한다[5]. 연속파형 변조된 형태를 일반적으로 FMCW레이더라고 불리며 오늘날 자동차에 많이 적용되고 있다. FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave)레이더는 신호 주파수를 시간에 따라서 연속적으로 변조하여 송신하고, 수신신호 주파수를 이용하여 속도 및 거리 정보를 추출한다. 일반적인 FMCW 송신기는 전압제어발진기, 증폭기, 전압분배기, 송신 안테나로 구성한다. 전압제어발진기는 송신신호의 주파수 변조를 위하여 사용되며, 증폭기는 전송신호를 확대시키고, 송신 안테나를 통하여 공간상에 신호를 방사한다. FMCW 수신기는 저잡음 증폭기, 혼합기, 저역통과필터, 아날로그-디지털변환기, 수신안테나로 구성된다. 목표물로부터 반사되어 안테나에 입사한 수신신호는 저잡음 증폭기로 수신 신호를 크게 하고 혼합기로부터 합 신호와 차 신호의 성분을 생성하고, 저역통과 필터기에서 합 신호 성분은 제거되고 차 신호 성분만 나타난다. 차 신호성분은 아날로그-디지털변환기로 입력되어서 고속 푸리에 변환기(Fast Fourier Transform)로부터 거리 및 속도 정보를 획득할 수 있는 주파수 스펙트럼을 추정할 수 있다.

본 논문에서는 등 간격 선형 배열안테나 시스템의

신호 대 잡음비를 향상시키기 위해서 시간 지연 보상 제어 알고리즘을 제안한다. 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘은 수신 신호에 가중치를 적용하여 각 안테나 배열소자마다 수신 신호의 시간 지연을 보상하는 방법이다. 제안한 제어 알고리즘을 FMCW 레이더 방정식의 신호 대 잡음비에 적용하여 목표물의 거리정보 추정을 향상 시킨다.

2. 레이더 탐지거리 분석

레이더 송신신호의 탐지거리 전력밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다[6-8].

$$\text{레이더 반사신호 전력밀도} = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (1)$$

여기서, P_t 는 송신전력, G_t 는 송신기이득, R 은 레이더와 목표물까지의 거리를 나타내고 σ 는 레이더 단면적(RCS : Radar Cross Section)으로 목표물에서 송신기로 재 방사되는 전력량으로 레이더에서 보이는 물체의 크기를 나타낸다. 레이더의 수신 신호전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2)$$

여기서 G_r 은 수신기의 이득, λ 는 파장을 나타낸다. 레이더방정식은 다양하게 존재하며 수신신호의 전력을 추정할 수 있어서 시스템의 신호대 잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)에 의해서 최대 탐지거리를 추정할 수 있다. 협대역 필터의 대역폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta f = \frac{1}{T_{DW}} \quad (3)$$

여기서 T_{DW} 는 드웰타임(Dwell Time)이며, 협대역 필터의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{FFT} = \frac{2B}{\Delta f} \quad (4)$$

대역폭 B 는 FFT(Fast Fourier Transform)에 의해서 최대분해가능한 주파수이다. 드웰타임은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{DW} = \frac{N_{FFT}}{2B} \quad (5)$$

일반적인 레이더 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \left(\frac{P_t \tau T_i f_r G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e FL(SNR)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

여기서 R 은 레이더에서 목표물까지의 거리, k 는 볼츠만 상수, T_e 는 절대 잡음온도, F 는 잡음지수, L 은 전체손실, P_t 는 피크송신전력, τ 는 펄스폭, f_r 는 펄스반복주파수, G_t 는 송신안테나 이득, G_r 는 수신안테나 이득, λ 는 파장, σ 는 RCS, $T_i = \frac{n_p}{f_r}$ 로 송신기에서 방사된 빔이 목표물에 부딪히는 시간을 나타낸다. n_p 방사된 빔이 목표물에 부딪히는 펄스 수이다. 식(6)의 펄스 레이더방정식에서 $P_t \tau f_r$ 를 평균 CW전력(P_{CW})으로 그리고 T_i 는 T_{DW} 로 대체하면 연속파형 방정식으로 변환 할 수 있다.

$$R = \left(\frac{P_{CW} T_{DW} G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e FL(SNR)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

3. 시간 지연 보상 제어 알고리즘

본 장에서는 신호대 잡음비 향상을 위해서 시간 지연 보상 제어 알고리즘을 연구한다. 본 연구에서는 M ($1 \leq m \leq M$)개소자로 구성된 등 간격 선형 배열 안테나를 적용하며, 각 배열 소자간 거리는 d 로 나타낸다. 그림1은 등 간격 선형 배열 안테나 시스템으로서 수신 안테나에 입사한 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다[9-11].

$$s(t) = A \exp(j(\omega_0 t + \theta)) + n(t) \quad (8)$$

여기서 A 는 수신 신호 크기, 각주파수 $\omega_0 = 2\pi f_0$, θ 은 위상, f_0 은 주파수, $n(t)$ 잡음이다. 다중경로로 인하여 근접 배열 소자 사이의 출력신호는 시간지연(τ_m)이 발생한다. 근접한 m 번째 소자와 $m-1$ 번째 소자사이의 출력사이에는 거리로 인해서 시간지연이 발생한다. m 번째 배열 소자의 시간 지연은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_m = (m-1)(d/c)\sin\theta_0, \quad 1 \leq m \leq M \quad (9)$$

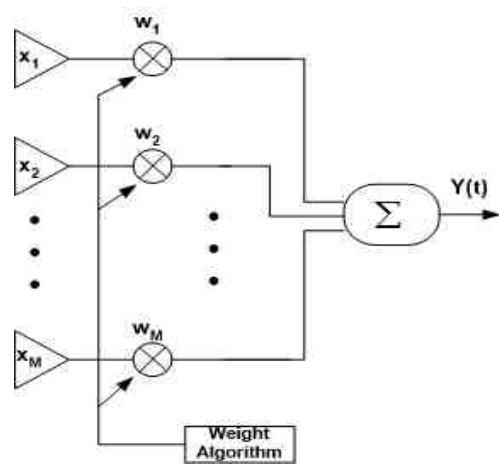


그림 1. 등 간격 선형 배열 안테나 시스템
Fig. 1. Uniform Linear Array Antenna System

여기서, d 은 배열 소자 사이 거리, c 은 전파속도, θ_0 는 입사각이다. P 개의 협 대역 신호가 수신 안테나에 입사할 때 m 번째 배열 소자의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_m(t) &= \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^P s(t + \tau_m) + n_m(t) \quad (10) \\ &= A \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^P \exp[-j\omega_0(d/c)(m-1)\sin\theta_k] + n_m(t) \end{aligned}$$

여기서, $k(1 \leq k \leq P)$ 는 협대역 신호이다. 등 간격 선형 배열 안테나 시스템의 출력신호는 수신신호에 가중치를 곱하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m x_m(t + \tau_m) \quad (11)$$

여기서 w_m 은 m 번째 배열소자에 대한 최적 가중치이다. m 번째 배열 소자의 지연 시간을 보상한 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다[12-14].

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^P s_k(t) e^{j\omega_0(\tau_m - \tau_{k,m})} + n_m(t - \tau_m) \quad (12)$$

$$\tau_{k,m} = (m-1)(d/c)\sin\theta_k, 1 \leq k \leq P \quad (13)$$

등 간격 선형 배열안테나 시스템의 출력신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m \left[\sum_{k=1}^P s_k(t) e^{j\omega_0(\tau_m - \tau_{k,m})} + \sum_{k=1}^P n_m(t + \tau_m) \right] \quad (14)$$

τ_m 과 $\tau_{k,m}$ 일치하면 시간지연이 보상된 경우이다. 배열 소자에 입사하는 신호들은 배열 소자의 위치로 시간지연과 위상차가 발생한다. 시간 지연을 보상하기 위해서는 m 번째 배열 소자 신호에 대해서 $m \pm 1$ 배열 소자들의 입사 신호 위상을 보상한다. 시간지연 보상을 위한 식(14)은 m 번째 배열 소자 신호와 최적가중치를 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m s_{k_0}(t) \sum_{m=1}^M w_m \cdot \left[\sum_{k=1}^P s_k(t) e^{j\omega_0(\tau_m - \tau_{k,m})} + \sum_{k=1}^P n_m(t + \tau_m) \right] \quad (15)$$

지연 시간이 보상된 등 간격 선형 배열 안테나의 신호 대 잡음비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SNR = M \frac{E[s_k(t)^2]}{\sigma^2} \quad (16)$$

4. 모의실험

본 장에서는 지연시간이 보상된 신호 대 잡음비를 이용하여 목표물 정보를 추정하는 모의실험을 하였다. 목표물 정보는 신호 대 잡음비에 따른 거리를 추정하였으며 지연시간이 보상되지 않은 신호 대 잡음비와 성능을 모의실험으로 비교 하였다. 모의실험 조건은 다음과 같이 설정하였다.

표 1. 모의실험 입력 데이터
Table 1. Simulation input data

레이더변수	모의실험치
주파수	77GHz
이득	25dB
RCS	10dBsm
절대온도	290K
대역폭	4MHz
잡음지수	20dB
레이더손실	10dB

그림2와 그림3은 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘과 일반적인 레이더 방정식으로 신호 대 잡음비에 따른 목표물의 거리를 추정한 그래프를 나타내었다. 그림2는 송신전력이 18dBm일때 제안한 제어 알고리즘과 기존 알고리즘에 대한 성능을 나타내었으며 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘이 기존의 알고리즘보다 목표물에 대한 거리가 증가하여 거리 추정능력이 향상된 것을 나타내었다. 그림3은 송신전력이 25dBm일때 제안한 제어 방법과 기존 알고리즘에 대한 성능을 나타내었으며 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘이 기존 알고리즘보다 목표물에 대한 거리가 증가하여 목표물 추정거리 능력이 향상된 것을 나타내었다.

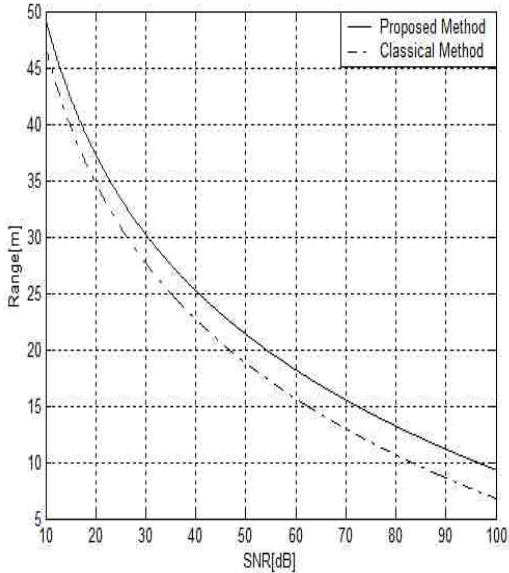


그림 2. 송신전력(18dBm)에서 제안 알고리즘과 기존 알고리즘 목표물 거리 추정

Fig. 2. Estimation of the Target distance of Proposed and Existing Algorithm in Transmit Power(18dBm)

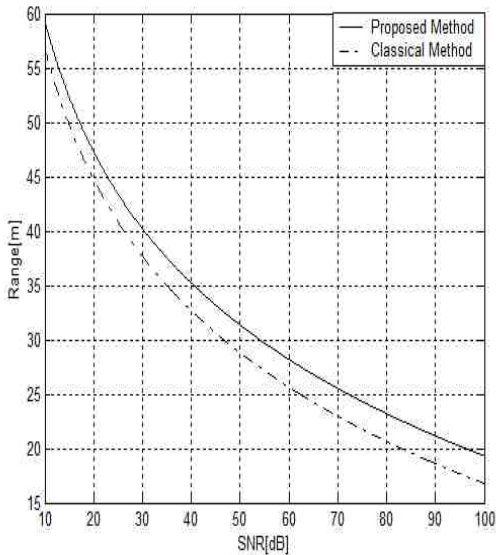


그림 3. 송신전력(25dBm)에서 제안 알고리즘과 기존 알고리즘 목표물 거리 추정

Fig. 3. Estimation of the Target distance of Proposed and Existing Algorithm in Transmit Power(25dBm)

표 2. 제안 알고리즘과 기존 알고리즘 목표물 거리 비교
Table 1. Compare proposed algorithm to existing algorithm for target distance

송신 전력 SNR	18dBm		25dBm	
	제안 방법	기존 방법	제안 방법	기존 방법
20dB	37m	35m	47m	45m
30dB	30m	27m	40m	37m
40dB	25m	23m	35m	27m

5. 결론

본 연구에서는 FMCW레이더에서의 거리 측정을 정확하게 추정하기 위해서 지연시간을 보상하여 정보를 추출하였다. 모의실험 결과에서 송신 평균전력을 증가시키면 거리추정능력이 증가되는 것을 확인할 수 있으며 지연시간을 보상한 알고리즘이 신호 대 잡음비에 대해서 추정 거리가 증가한 것을 나타내었다. 표2에서 송신전력(18dBm)와 SNR이 20dB 일 때 본 연구에서 제안한 방법의 거리추정능력은 37m이고 기존방법은 35m이다. 본 논문에서 제안한 제어 알고리즘이 기존 알고리즘보다 거리 추정 능력이 증가하였음을 나타내었다. 레이더가 거리를 추정하는 기능은 매우 중요한 요소이며 거리 오차를 극복하기 위한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 레이더 기능 중에서 거리추정에 대한 알고리즘을 제안하였으며 제안한 제어 알고리즘이 거리분해능과 탐지거리가 증가되어 기존 알고리즘보다 향상된 것을 나타내었다.

REFERENCES

- [1] Merrill I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", McGraw-Hill, 2000.
- [2] Bassem R. Mahafza, "Radar System Analysis and Design using Matlab", Chapman&Hall CRC, 2000.
- [3] Fred E, J.Patrick Reilly, Marvin

- BN.Cohen, and Nathanson, "Radar Design Principles", McGraw-Hill, 1991.
- [4] S.A.Hovanesian, "Radar System Design and Analysis", Artech House, 1984.
- [5] David K.Batron, Charles, E.Cgok, and Paul Hamilton, "Radar Evaluation-Handbook", Artech House, 1991.
- [6] Mark A.Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing", McGraw-Hill, 2005.
- [7] Harry L.Van Trees, "Optimum Array Processing", Wiley, Feb, 2002.
- [8] S. Unnikrishna Pillai, "Array Signal Processing", Springer-Verlag, 1989.
- [9] Frank B. Gross, "Smart Antenna for Wireless Communication with Matlab", McGraw Hill, 2005.
- [10] A.J.Haug and G.M.Jacyna, "Theory and analytical performance evaluation of generalized correlation beamformers", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.25, No.3, pp.314-330, Aug, 2000.
- [11] Khairy A. Ei Barbary, Tawil S. Mohamed, Mohamed. S. Melad, "High Resolution Direction of Arrival Estimation(Coherent Signal Source DoA Estimation)", IJERA, Vol.3 No.1, pp.132-137, Sept, 2016.
- [12] Xin Cai, Xiang Wang, Zhi Tao, and Feng Hua wang, "Single channel steepest descent algorithm for the correction of cycle frequency error", IET communications, Vol.10, No.14, Sept, 2016.
- [13] Dongwen Ying, Junfeng Li, Yonggiang Feng, and Yonghong Yan, "Direction of arrival estimation based on weighted minimum mean square error", IEEE China summit and International Conference on Signal and Information Processing, July, 2013.
- [14] Cheol Sun Park, Jun Ho Choi, Jong Won Yang and Sum Phil Nah, "Direction of Arrival Estimation using Weighted Subspace Fitting with unknown number of Signal Sources", IEEE 11th International Conference on Advanced Communication Technology, Feb, 2009.

 저자약력

이 민 수(Min-Soo Lee)

[정회원]



- 1994년 2월 : 한양대학교 전파통신공학과 졸업 공학박사
- 1995년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 휴먼IT융합학부 교수

〈관심분야〉

안테나, 마이크로웨이브소자