

밀리미터 파 센서를 이용한 무인 자동차용 거리 측정기에 대한 연구

도 태용**, 김 성도*, 정 명진*, 박 승모**, 양 배덕**

한국 과학 기술원 전기및 전자공학과*
국방 과학 연구소**

A Study on Range Sensor for Autonomous Guided Vehicle
using Millimeter Wave Sensor

Do Tae Yong**, Kim Seong Do*, Chung Myung Jin*, Park Seung Mo**, Yang Bae Duck**

Dept. of E.E. KAIST*, ADD**

Abstract

The ultrasonic sensor used in autonomous mobile robot and autonomous guided vehicle(A.G.V.) is not available for long range measurement. And as the performance of autonomous mobile robot and A.G.V. improves, the importance of the range sensor for long range measurement is increasing.

In this paper, we introduce the range sensor for long range measurement using millimeter wave sensor and propose the structure of that system.

1. 서 론

자율 이동 로봇(autonomous mobile robot)이나 무인 자동차(autonomous guided vehicle)에는 주변 환경에 대한 정보를 얻어 경로 계획을 하고 경로상에 존재하는 장애물을 탐지하여 충돌을 회피하기 위해 거리 측정이 필수적이다.

자율 이동 로봇의 경우 작업환경이 실내이기 때문에 비교적 근거리용 거리 측정 센서로 거리를 측정하여 주변 환경을 인식해왔으며 근거리용 거리 센서로 대표적인 것이 초음파 센서이다. 초음파 센서는 경량이고 값이 싸며 옴파인 관계로 저주파수에서도 짧은 파장을 얻을 수 있어 해상도를 높일 수 있다. 예를 들면, 50 KHz의 초음파는 6.6 mm의 파장을 가지나 이에 상응하는 파장을 가지는 전자기파는 45.5 GHz의 주파수를 가진다. 그러나 빔폭이 30°의 광폭이어서 방위각에 대한 해상도가 매우 나쁘며 물체의 표면이 매끈할 경우 전반사가 일어나서 거리 측정이 불가능하다. 그리고 초음파는 소밀파 특성 때문에 매질의 영향을 심하게 받고 공기 중에서 전파(propagation) 성능이 전자기파에 비해 심하게 떨어져 10 여 m 이상의 원거리에서는 거의 사용하지 않는다. 이런 특성 때문에 초음파 센서는 실내용 자율 이동 로봇에 사용되어왔으나 보다 먼 거리를 측정하여 자율 이동 로봇과 무인 자동차의 주행 성능을 향상시키는데 무리가 있어 시각 센서의 보조 센서의 역할만 수행해왔다.[6]

실외에서 고속으로 주행할 수 있는 무인 자동차는 빠른 환경 변화 때문에 보다 먼 거리의 환경에 대한 정보를 얻는 것이 필수적이다. 원거리에 대한 거리 측정은 빠른 환경 변화에 대한 무인 자동차의 주행과 장애물 회피를 위한 보다 많은 시간을 프로세서에 제공함으로써 무인 자동차의 프로세서에 부담을 주지 않아 고성능의 프로세서를 필요로 하지 않아도 된다. 이런 특성은 자율 이동 로봇의 고속 주행에도 적용된다.

본 논문은 원거리용 거리 측정기에 대한 연구 논문으로써 전자기파 중에서 기상 특성이 우수하며 소형화가 가능한 밀리미터 파를 이용한 비교적 저가이고 원거리 측정이 가능한 거

리 측정기에 대해서 소개하고 FM/CW(frequency modulation/continuous wave) 레이더 시스템을 응용한 폐환 루프(feedback loop)를 가진 서보(servo) 루프 방식에 대해 소개한다.

2. 밀리미터 파의 특성

밀리미터 파는 마이크로 파와 광파의 중간 대역인 30 GHz에서 300 GHz사이의 주파수 영역을 가지고 1 mm에서 1 cm사이의 파장을 가진다. 밀리미터 파는 마이크로 파에 비해 파장이 짧아 소형화가 가능하고 중거리에서의 대기 중에서 파의 전력 손실이 적어 약친후에 대한 특성이 광파에 비해 우수하다. 밀리미터 파는 전반적으로 복사 중에 산소, 물, 수소 등 대기 구성분자와 충돌하여 감쇄가 심하지만 비교적 감쇄가 적은 35 GHz, 94 GHz, 114 GHz 등의 대역이 있다. 이런 밀리미터 파중에서 마이크로 파에 가까운 Ka 대역의 비교적 저주파 대역인 35 GHz 대역의 밀리미터 파를 주로 이용한다. 그리고 35 GHz 대역의 밀리미터 파는 빔폭이 일반적으로 3° 내지 4°가 되어 방위각에 대한 해상도가 우수하고 초음파에 비해 파의 속도가 빨라서 파사이의 간섭이 적어서 원거리에 대한 측정값이 정밀해진다.

3. 기존의 거리측정기

밀리미터 파 거리 측정기를 구현하는데는 기존의 거리 측정기인 FM/CW 거리 측정기, 펄스 거리 측정기 등이 고려된다.

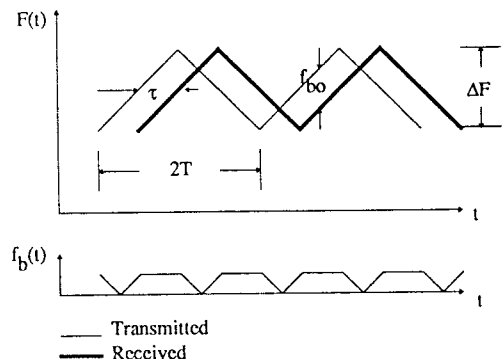


Fig.1 FM/CW 거리 측정기의 송수신파의 관계

FM/CW 거리 측정기에서 목표물이 평면을 이루고 있다고 가정하면 Fig.1에서 보는 것처럼 어느 특정 시간에서 송신파와 수신파의 주파수차인 비트(beat) 주파수가 주파수 혼합기(mixer)의 출력으로 발생하게 된다. 이 때 비트 주파수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[4]

$$f_b = F(t) - F(t - \tau) \quad (1)$$

$$\approx \frac{dF}{dt} \tau - \frac{d^2F}{2dt^2} \tau^2 + \dots$$

(1)식에서 선형 부분만 고려하면,

$$f_b = \frac{dF}{dt} \tau \quad (2)$$

이고 ΔF 와 $\frac{dF}{dt}$ 와의 관계를 고려하면,

$$f_b = \frac{dF}{dt} \left(\frac{2h}{c} \right) = \left(\frac{2\Delta F}{T} \right) \left(\frac{2h}{c} \right) \quad (3)$$

$$= \frac{4\Delta F}{cT} h$$

여기서 h 는 거리, c 는 광속이다. 비트 주파수는 (3)식의 관계를 가지고 거리에 대한 정보를 가지게 된다.

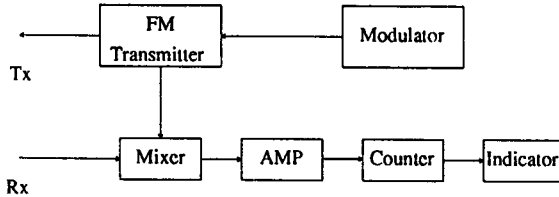


Fig.2 FM/CW 거리 측정기의 구성도

FM/CW 거리 측정기는 Fig.2와 같은 구성을 가진다. 따라서, 비트 주파수는 거리가 변함에 따라 가변하므로 광대역의 IF 증폭기가 필요하고, 비트 주파수 신호가 0점을 통과하는 수를 세어서 주파수를 측정함으로써 잡음에 약하고, 양자화 오차가 발생하기 쉽다.

펄스 거리 측정기는 폭이 좁은 펄스를 안테나를 통해 보낸 후 펄스가 목표물을 맞고 되돌아 오는 시간을 측정하여 거리를 측정한다. 이 때 펄스의 상승시간(t_r)을 빠르게 하기 위해서 (4)식에서 표현된 것처럼 IF 증폭기가 광대역 증폭 특성을 가져야한다.[4]

$$t_r = \frac{3.3}{BW} \quad (4)$$

FM/CW 거리 측정기와 펄스 거리 측정기의 공간 손실은 (5)식으로 표현되는 일반식으로 쓸 수 있다.

$$L = \frac{P_r}{P_t} = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{64\pi^3 h^4} \quad (5)$$

P_r : 수신 전력
 P_t : 송신 전력
 λ : 파장

σ : radar cross section

빔폭을 제한할 경우 (5)식은 (6)식으로 표현할 수 있다.

$$L = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma_o(0)}{16\pi^3 h^2} \quad (6)$$

$$h_c = \frac{c \delta G}{4} \quad (7)$$

$$L = \frac{G\lambda^2 \sigma_o(0)}{16\pi^3 h^2} \frac{h_c}{h} \quad (8)$$

(6)식이 나타내는 것처럼 공간 손실은 거리에 따라 6 dB/octave씩 발생한다. 그러나 펄스 거리측정기의 경우 (7)식으로 표현되는 임계 거리(h_c)가 존재하여 (8)식에서 표현되는 것처럼 임계 거리가상에서는 거리에 따라 9 dB/octave의 공간 손실을 가진다. 펄스 거리측정기는 임계 거리가상에서는 공간 손실이 FM/CW 거리측정기보다 커서 전력소모가 상대적으로 크다.[2][3]

4. 서보 루프 거리 측정기

서보 루프 거리 측정기는 Fig.1의 FM/CW 거리 측정기의 송수신파의 관계를 가지나 비트 주파수(f_b)를 일정하게 유지하기 위해 시스템에 feedback 루프를 가진다. 이 때 거리와 비트 주파수의 관계는 (3)식과 유사하나 시스템 자체의 시간지연(A.I.D.: Airborne Installation Delay)가 존재하여 식이 아래와 같이 약간 변형된다.

$$f_b = \Delta F \frac{2\tau}{T} \quad (9)$$

$$\tau = \tau_o + \frac{2h}{c} \quad (10)$$

$$f_b = \frac{2\Delta F}{T} \left(\tau_o + \frac{2h}{c} \right) \quad (11)$$

$$= \frac{2\Delta F}{T} \tau_o + \frac{4\Delta F}{cT} h$$

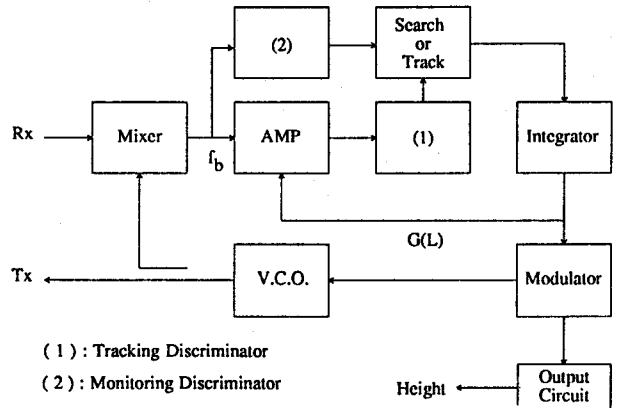
여기서 τ_o 는 A.I.D.이다. 비트 주파수가 고정됨으로 거리에 따라 변화시킬 수 있는 것은 ΔF 와 T 이다. ΔF 와 거리, T 와 거리의 관계식을 쓰면 (12)식, (13)식으로 표현된다.[1]

$$\Delta F = \frac{f_b T}{2\left(\tau_o + \frac{2h}{c}\right)} \quad (12)$$

$$T = \frac{2\Delta F}{f_b} \left(\tau_o + \frac{2h}{c} \right) \quad (13)$$

$$= T_o + \frac{4\Delta F}{cf_b} h$$

여기서 T_o 는 목표물과의 거리가 0일 때의 주파수 변조 주기이다. ΔF 는 거리와 반비례의 관계를 가지고 T 는 거리와 비례 관계를 가진다.



(1): Tracking Discriminator

(2): Monitoring Discriminator

Height ← Output Circuit

Fig. 3 서보 루프 거리 측정기의 구성도

서보 루프 거리 측정기는 ΔF 를 가변 하는 방식이나 T 를 가변 하는 방식에 관계없이 Fig.3와 같은 구조를 가진다.

모니터링 주파수 변별기는 기준 비트 주파수(f_{bo})에서

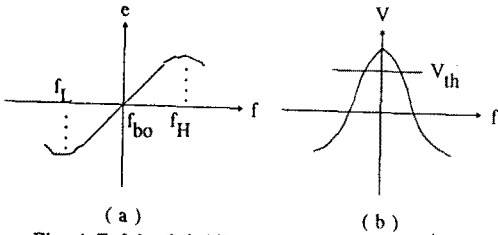


Fig. 4 주파수 변별기(Discriminator)의 특성 곡선

(a) 트래킹 주파수 변별기 (Tracking Discriminator)

(b) 모니터링 주파수 변별기 (Monitoring Discriminator)

비트 주파수 신호를 확인한다. 만일 문턱값(V_{th})보다 낮은 값의 비트 주파수 신호가 발생하면 지시계는 거리 측정 불가 지점, 즉 너무 멀거나 너무 가까운 지점에 물체가 존재함을 알린다. 비트 주파수 신호가 작으면 ΔF 나 T 를 가변시키는 적분기 전압의 계속 증가로 인해 짧은 거리에서부터 먼 거리까지 물체를 탐색한다. 트래킹 주파수 변별기는 모니터링 주파수 변별기에 의해 물체의 존재가 확인이 되면 물체와의 거리를 측정하는 역할을 한다. 기준 비트 주파수와 현재 들어오는 비트 주파수 신호와의 차이에 비례하는 값을 적분기로 내보내어 ΔF 나 T 를 가변시켜 기준 비트 주파수에 비트 주파수 신호가 따라가도록 한다.[1]

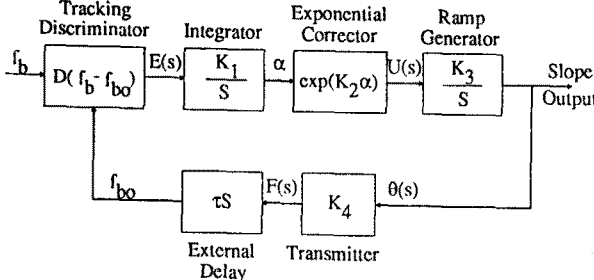


Fig.5 서보 루프의 Block Diagram

모니터링 주파수 변별기에 의해 물체의 존재가 확인된 후 트래킹 주파수 변별기에 의해 이루어진 서보 루프는 Fig.5처럼 모델링할 수 있다. 이 서보 루프는 다음의 미분 방정식으로 표현된다.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} - K_1K_2D(\tau K_4 \frac{d\theta}{dt} - f_{bo}) \frac{d\theta}{dt} = 0 \quad (14)$$

여기서 T 가 변수이고 ΔF 가 일정하다고 가정하고 주파수를 삼각파로 변조하는 대신 램프(ramp) 함수로 변조한다면 램프의 기울기는 (15)식의 관계를 가진다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{V_o}{T} \quad (15)$$

(15)식을 (14)식에 대입하면

$$T - \frac{1}{K_1K_2Df_{bo}} \frac{dT}{dt} = \tau K_4 V_o \quad (16)$$

이 되고 K_4 와 V_o 를 조정하여 (16)식에서 (17)식의 최종식을 얻을 수 있다.

$$T - \frac{1}{K_1K_2Df_{bo}} \frac{dT}{dt} = \frac{2\Delta F}{cf_{bo}} h \quad (17)$$

$$\tau_{loop} = -\frac{1}{K_1K_2Df_{bo}} \quad (18)$$

(17)식은 1차 선형 미분방정식이고 루프 시정수는 (18)식으로 주어진다. (18)식에서 K_2 는 음수여서 루프 시정수가 충분히 작으면 주파수 변조주기(T)는 거리에 비례하여 변하게 되고 폐환 루프는 안정성이 보장된다.

지수 함수 수정 증폭기(exponential corrector)는 루프 시정수를 일정하게 만드는 역할을 한다. 예를 들어 설명하면 지수함수 수정 증폭기가 없을 경우 거리가 1 m일 때 (15)식의 값이 1이면 2 m일 때는 0.5이고 10 m일 때는 0.1, 20 m일 때는 0.05이다. 이렇듯 거리에 따라 (15)식의 값, 즉 램프 함수의 기울기에 따라 적분기의 출력이 심하게 변한다. 지수 함수 수정 증폭기를 램프 함수 발생기앞에 설치하면 적분기의 출력값은

$\ln(\frac{1}{h})$ 에 비례하여 물체와의 거리가 급격히 변할 경우에도 적분기의 출력이 급격하게 변하지 않아 루프 시정수를 일정하게 유지할 수 있다. 이와 같은 특성은 모니터링 주파수 변별기를 사용하는 물체 탐색상태의 경우에서도 유용하게 이용된다. 적분기의 값이 거리에 따라 급격히 변하지 않기 때문에 물체를 탐색하는데 걸리는 시간이 거리에 관계없이 거의 일정하게 된다.

위에서 밝힌 여러 성질은 ΔF 를 가변하는 서보 루프 거리 측정기에도 유용하나 ΔF 가 거리에 반비례하는 특성으로 인해 회로 구성상 다소의 어려움이 존재할 것이다.

ΔF 와 T 를 동시에 가변시켜 거리에 대한 정보를 얻을 수 있다. (12)식에서 알 수 있듯이 ΔF 는 거리에 반비례 관계가 있어 원거리에서 ΔF 로 거리를 측정한다면 램프 함수의 기울기에 급격한 변화가 없어 적분기에 부담이 가지않는다. 그리고 (13)식에서 알 수 있듯이 T 는 거리에 비례하므로 근거리 측정에 T 를 이용하여 거리를 측정한다면 원거리에서 ΔF 로써 거리를 측정하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

5. 결론

레이더 시스템에 응용되어오던 전자기파를 이용하여 무인 자동차나 자율 이동 로봇의 원거리 측정용 거리측정기에 대한 소개를 했다. 그 중 아직 국내에서는 잘 알려지지 않은 밀리미터 파를 이용하여 아주 좁은 빔폭 특성을 얻으면서 동시에 소형화가 가능한 원거리용 거리측정기를 구현할 수 있고 기존의 레이더 시스템이나 초음파 거리측정기에 응용되어오던 FM/CW 거리 측정기를 개선한 폐환 루프가 있는 서보 루프 거리 측정기를 이용하여 거리측정에 있어서 신뢰성을 향상시킬 뿐만 아니라 송수신기부분을 제외한 부분은 좁은 주파수 대역 특성을 가지는 소자들로도 회로 구성이 가능하여 경제적이다.

밀리미터 파의 우수한 특성과 서보 루프 거리 측정기의 뛰어난 기능을 갖춘 밀리미터 파 거리 측정기는 관측 물체와의 거리가 계속 변하는 경우에도 거리 측정이 용이하여 자동차의 충돌 방지 시스템에 응용될 수 있으며[7] 원거리 측정 기능을 무인 자동차나 자율 이동 로봇의 고속 주행에 응용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] T.R.T., "AHV20 Radio Altimeter", 1980
- [2] Nadav Levanon, "Radar Principles", John Wiley & Sons, Inc., 1988
- [3] Fred E. Nathanson, "Radar Design Principles", McGraw-Hill Book Company, 1969
- [4] Skolnik, M. I., "Introduction to Radar Systems", McGraw-Hill Book Company, 1980
- [5] Roman Kuc, "Physically Based Simulation Model for Acoustic Sensor Robot Navigation", IEEE Trans. on Patt. Anal. & Mac. Int., Vol. PAMI-9, No.6, Nov. 1987
- [6] 포항공과대학교, "무인화 운행 기법에 대한 연구", 1990
- [7] Susumu Kitazume, "Advances in Millimeter-wave Subsystems in Japan", IEEE Trans. on Micro. Theory & Tech., vol. 39, No. 5, May 1991