

YIG-VCO를 사용한 산업용 마이크로파 거리계의 개발

Development of a Microwave Level Meter Using YIG-VCO for Industrial Process

김정목* · 임종수* · 전중창** · 김태수** · 안광호*** · 이승학****

Jeong-Mok Kim* · Jong-Soo Lim* · Joong-Chang Chun** · Tae-Soo Kim** ·
Kwang-Ho Ahn*** · Soong-Hak Lee****

요 약

본 논문에서는, YIG 발진기(YTO)를 사용한 산업용 FM-CW 마이크로파 거리계를 설계 제작하여, 그 측정 결과를 제시하였다. YTO는 주파수 선형성이 매우 우수하므로 거리계의 구성에서 별도의 선형화 장치를 필요로 하지 않는다. 운용환경 주변의 장애물로부터 발생하는 반사 신호를 제거하기 위해서 중간주파 신호에 디지털 대역통과 필터를 적용하였다. 이를 위해서 Kaiser window를 사용한 FIR 필터가 설계되었다. 거리 측정 테스트는 40m까지 측정할 수 있는 야외 시험장에서 1m 간격으로 실시되었으며, 측정오차의 표준편차가 2.33cm인 측정 결과를 얻었다. 본 논문에서 제작된 마이크로파 거리계는 제철소의 용선 운반 차량과 같이 사람이 접근하기 어려운 산업 시설에서 거리측정용으로 사용될 수 있다.

Abstract

In this paper, we have designed a microwave level meter based on the FM-CW radar theory using a YIG-tuned oscillator (YTO). YTO has an excellent frequency linearity, so a linearizer circuit is not necessary for the level meter. It is shown that interference signals reflected from nearby obstacles can be removed by using a digital band-pass filter. An FIR band-pass filter is designed using the Kaiser window. The distance measurement has been performed in the outdoor test field. The measurement data have been obtained for the range of 1~40 m with 1 m step, and the results show that the standard deviation of the measured data is 2.33 cm. The level meter manufactured in this study can be applied usefully in the industrial facilities which are not accessible easily, for example, to measure the level of molten metal in the iron and steel company.

I. 서 론

마이크로파 거리계는 전자파 에너지를 발사하여 표적물로부터 반사되어 되돌아오는 반사파의 도착 시간을 측정함으로써 송신 안테나와 표적물 사이의

거리를 측정하는 장치이다^[1]. 마이크로파 거리계의 동작 원리는 레이더 시스템과 동일하며, 레이더 시스템은 2차 세계대전 이후 대공용이나 선박용 등의 장거리 측정용으로 널리 사용되고 있다. 또한, 근래에 들어서 레이더 시스템은 중화학 산업단지의 대형

* 포항산업과학연구원 센서계측연구팀(Research Institute of Industrial Science and Technology)

** 위덕대학교 정보통신공학과(Department of Computer and Comm. Eng., Uiduk University)

*** 포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electronics and Electrical Eng., POSTECH)

**** (주)엘티아이(LTI)

· 논문 번호 : 991208-03S

· 수정완료일자 : 2000년 1월 19일

탱크 레벨 측정, 제철소 용광로의 용선(molten metal) 높이 측정, 비행기 항법 시스템의 고도 측정, 그리고 첨단 교통 시스템(Intelligent Transportation System)을 위한 차간 거리 측정 등의 근거리 측정 장치에도 응용되고 있다^[2]. 거리 측정 장치에는 마이크로파 외에도 초음파 또는 레이저 광선 등도 사용될 수도 있지만, 고온 가스 난류, 분진 등으로 측정 환경이 열악한 곳에서는 주변 환경 조건에 영향을 거의 받지 않는 마이크로파 거리계를 사용하는 것이 가장 효과적이다^[1].

일반적인 레이더가 수 백 킬로미터의 측정 거리를 대상으로 하는 반면에, 산업계에서 요구되는 거리계는 그 측정 거리가 수 십 미터 이내이고 정밀도도 수 밀리미터 이내여야 한다^[3]. 레이더 원리를 이용한 근거리 측정 장치에는 펄스 방식과 주파수 변조 연속파(Frequency-Modulated Continuous-Wave: FM-CW) 방식이 주로 이용된다. 근거리 측정용에 펄스 레이더 방식이 이용될 경우에는 시간 확장(time expansion) 기법이 적용되며, 측정 해상도를 높이기 위해서는, 매우 근소한 차를 갖는 두 개의 오실레이터를 필요로 한다^{[4],[5]}. 예를 들면, 4.5 mm의 해상도를 얻기 위해서는 3.600000 MHz와 3.599621 MHz의 두 발진 주파수가 필요하게 된다. 운용 환경의 온도 변화, 부품의 노후화(aging) 등에서도 이렇게 발진 주파수를 정밀하게 유지시키는 것은 용이하지 않은 일이다. 또한 안테나에서 송출되는 펄스는 그 폭이 1 nsec 정도로 매우 짧아야 하므로, 전체적으로 회로가 매우 복잡하고, 근본적으로 안정도 및 측정 해상도에서 한계점을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서 거리계의 설계 방향은 FMCW 레이더 방식으로 설정하였다. 한편, 근거리용의 FMCW 방식 거리계에서는 전압제어 발진기(voltage-controlled oscillator: VCO)의 선형적인 주파수 특성이 중요한 관건으로 작용된다^{[6],[7]}. VCO에는 버랙터 다이오드를 이용한 VTO(varactor-tuned oscillator)와 YIG를 사용하는 YTO(YIG-tuned oscillator)가 있다. YTO는 VTO에 비하여 부품 가격이 높고, 구동 회로가 복잡한 단점이 있지만 주파수 선형성이 매우 우수하므로, 고정밀용 거리계에 적합한 발진기이다.

본 연구에서는 YTO를 사용하여 40 미터 이내의 거리를 측정할 수 있는 산업용 마이크로파 거리계를

설계, 제작하였다. 사용된 주파수는 X 밴드(8~10 GHz)이며, 변조 대역폭은 2 GHz 이다. 그리고 디지털 필터 기법을 적용하여 주변 장애물에 의한 반사 신호를 제거하였으며, 1~40 m의 거리에 대한 측정 결과를 제시하였다.

II. FM-CW 레이더의 기본이론

FMCW 레이더의 동작 이론은, 여러 문헌에 잘 설명되어 있는 바와 같이, 시간에 따라 일정한 형태로 캐리어 주파수를 변조시켜 측정하고자 하는 표적물에 투사하여, 송신신호와 수신신호의 주파수 차를 측정함으로써 거리를 역으로 환산하는 장치이다^[8]. FMCW 레이더의 기본적인 시스템 구성도를 그림 1에 보였다. 안테나에서 측정 면까지의 거리 d 는 아래 식과 같이 비트 주파수(beat frequency) f_b 에 비례한다^{[7],[8]}.

$$d = \frac{cf_b}{4f_m \Delta f} \tag{1}$$

여기서 c 는 공기중의 광속을, f_m 은 변조 신호의 주파수를, Δf 는 VCO의 주파수 대역폭을 각각 나타낸다. 이 식에서 거리 해상도는 주파수 대역폭 Δf 에 반비례함을 알 수 있으며, 해상도를 높이기 위해서는 VCO의 주파수 대역폭이 넓어야 한다. 그리고 비트 주파수 f_b 는 식 (2), (3)과 같이 송신주파수 f_{Tx} 와 수신 주파수 f_{Rx} 의 차로 계산된다.

$$f_b(t) = f_{Tx}(t) - f_{Rx}(t) = f_{Tx}(t) - f_{Tx}(t - \tau) \tag{2}$$

$$\tau = \frac{2d}{c} \tag{3}$$

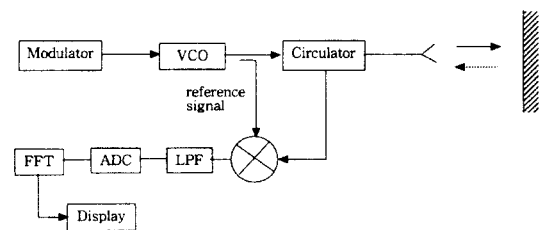


그림 1. FMCW 레이더의 기본 구성도
Fig. 1. Block diagram of the FM-CW radar.

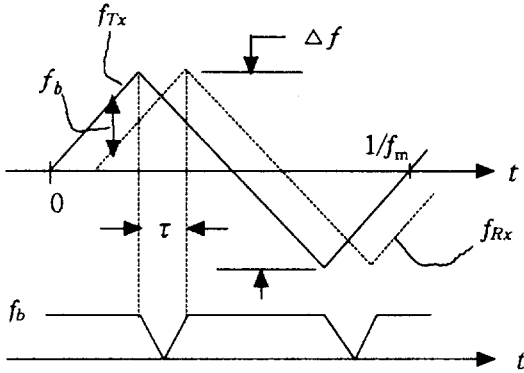


그림 2. FM-CW 레이더의 시간-주파수 다이어그램
Fig. 2. Time-frequency diagram in the FM-CW radar system.

그림 2는 송수신 주파수와 비트 주파수에 대한 시간 다이어그램을 나타낸다. 여기서 비트 주파수 f_b 가 일정한 값으로 유지되기 위해서는 VCO의 주파수변조 특성이 우수하여야 함을 볼 수 있다. VCO 주파수 특성을 평가하는 척도인 선형도(linearity) L 은 다음과 같이 정의된다.

$$L = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}} \cdot 100 (\%) \quad (4)$$

여기서 S_{\max} 과 S_{\min} 은 변조 주파수 범위 내에서 튜닝감도(tuning sensitivity)의 최대값과 최소값을 각각 나타낸다. 튜닝 감도 S 는 단위 제어전압 변화에 대한 출력 주파수 변화의 비, 즉, 전압-주파수 변조 특성곡선의 기울기를 나타내는 값이다.

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta V_{\text{control}}} \text{ (Hz/V)} \quad (5)$$

0%의 선형도는 전압-주파수 변조 특성곡선이 직선임을 의미하며, 양호한 FMCW 레이더 시스템 설계를 위해서는 0.1% 이하의 선형도가 유지되어야 한다.

비트 신호의 관측 시간 구간을 $T_s = 1/(2f_m)$ 로 설정하였을 경우, 주파수의 양자화 측정 오차(quantization error, step error)는 $1/T_s$ 로 주어진다^[8]. 이것은 이산 푸리에 변환에서 주파수 해상도가 $1/(N \Delta t) = 1/T_s$ 인 사실에서도 알 수 있다. 이것을 식 (1)에 대입하면 거리 오차 Δd 는 아래 식과 같이 된다.

$$\Delta d = \frac{c}{2 \Delta f} \quad (6)$$

따라서 측정 해상도를 높이기 위해서는 VCO의 변조 대역폭이 넓어야 한다. 한편, 변조 신호의 한 주기($1/f_m$) 동안 비트 신호를 관측하여 주파수를 결정할 경우에는 양자화 거리 오차 Δd 가 다음과 같이 된다.

$$\Delta d = \frac{c}{4 \Delta f} \quad (7)$$

이상에서 살펴본 바와 같이 FMCW 레이더는 그 동작 이론이 잘 알려져 있으며, 시스템 구성도 비교적 간단한 편이다. 그러나 VCO의 주파수 변조 특성이 우수하지 않으면 일정한 비트 주파수를 얻을 수 없게 되어 측정감도가 저하된다.

III. YTO를 사용한 마이크로파 거리계의 제작 및 실험 결과

본 연구에서 사용된 YTO는 Micro-Lambda의 YIG 발진기이며, 0~10 V의 제어전압에 의하여 8~10 GHz의 선형적인 주파수 변조 특성을 갖는다. YTO 발진기에서 식 (4)에 정의된 선형도는 거의 0%에 도달한다. 그림 3에 YIG 마이크로파 거리계의 전체 구성도를 보였다. 거리계 시스템은 VCO 제어신호를 발생하는 삼각파 발생기(WaveTek AFG), 캐리어 신호를 송수신하는 RF 모듈, 그리고 비트 신호를 검출 증폭하기 위한 아날로그 신호처리 부분 및 스펙트럼 분석을 위한 DSP 처리부로 이루어져 있다. RF 모듈의 회로 구성도를 그림 4에 도시하였다. 여기서 circulator, isolator, mixer, 증폭기 등의 RF 회로는 상용 부품을 사용하여 구성되었다. 그림 5에 아날로그 신호처리를 위한 회로 구성도를 도시하였다. 여기서 LPF(Low Pass Filter)는 그림 4의 중간주파 신호 중에서 상측 이미지 신호를 제거하기 위한 것이며, BPF(Band Pass Filter)는 안테나 부정합(mismatch)에 의한 비트신호를 검출하기 위한 것으로서, 시스템 교정용으로 이용된다. 실제 거리를 측정할 때에는 비트 신호가 HPF(High Pass Filter)와 로그 증폭기(LOG AMP)를 거쳐게 된다. HPF는 안테나 반사 신호를 제거하는 역할을 하

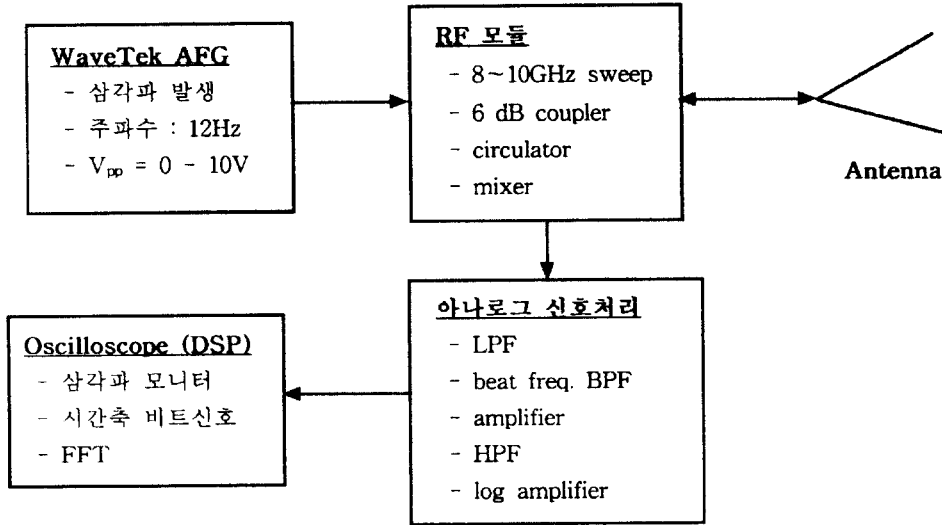


그림 3. YIG 마이크로파 거리계의 구성도

Fig. 3. System block diagram of a YIG microwave level meter.

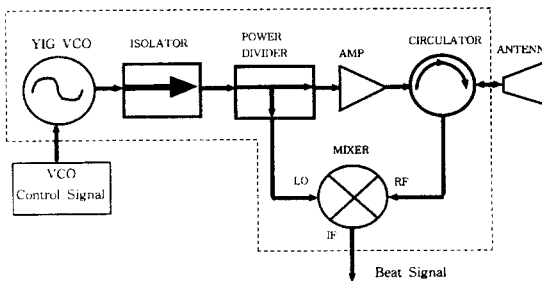


그림 4. RF 회로 구성도

Fig. 4. Schematic diagram of RF circuit interconnection.

며, 안테나와 표적물 사이의 거리가 멀수록 입사 신호가 미약하게 되므로 로그 증폭기는 이것을 보상하기 위해서 사용되었다. 제작된 거리계를 실험하기 위한 야외 실험장의 setup을 그림 6에 보였다. 야외 실험장은 도체 평판의 측정 표적물과, 직선 거리를 유지하기 위한 레일, 그리고 거리 확인용 레이저 거리계로 구성되어 있다.

YTO 변조용 삼각파 신호의 주파수는 12 Hz, 데이터 샘플링 간격은 $4\mu\text{sec}$, 데이터 수는 10,000 개로 하였다. YTO 변조 대역폭은 2 GHz이며, 식 (7)에 의한 양자화 오차는 3.75 cm가 된다. 그림 7은

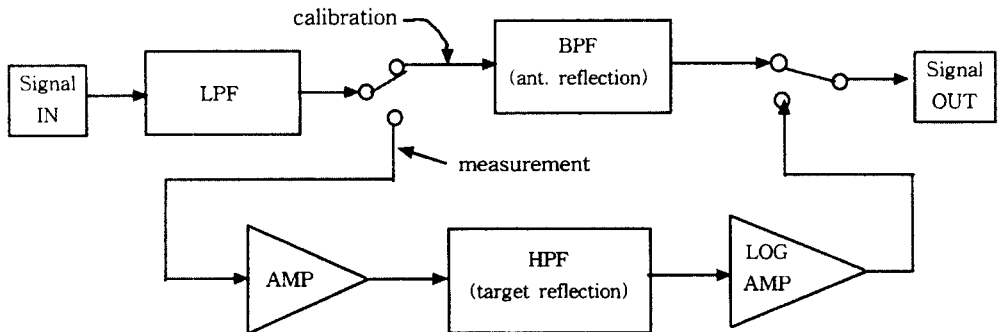


그림 5. 아날로그 신호처리 회로 구성도

Fig. 5. Circuit block diagram for analog signal processing.

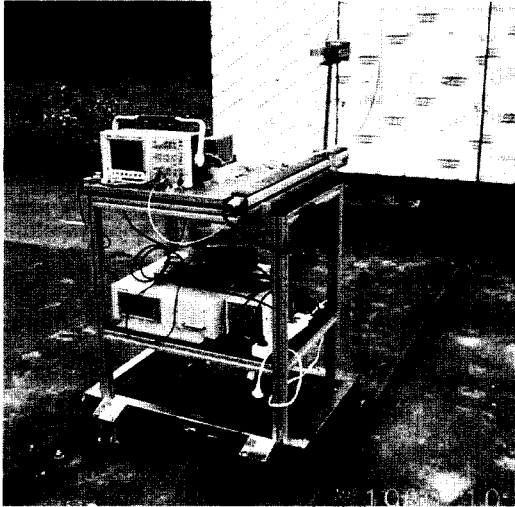


그림 6. 야외 실험장에 설치된 거리계 실험 setup
Fig. 6. Experimental setup of a microwave level meter established in an outdoor test field.

10.188 m의 거리에 대한 시간영역 중간주파(IF) 신호이며, 이것의 스펙트럼 모양을 그림 8에 나타내었다. 여기에서 안테나 반사파를 비롯한 여러 잡음신호가 비트신호와 함께 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 거리계가 실제 산업현장에서 사용될 경우에는 주위의 장애물에 의한 반사파 영향이 더욱 심하게 된다. 본 연구에서는 디지털 대역통과 필터를 적용하여 간섭신호를 제거하였다. 디지털 필터는 Kaiser Window⁽⁹⁾를 사용하였으며, 그림 7의 신호를 중심주파수 3818.75 Hz, 대역폭 200 Hz의 필터

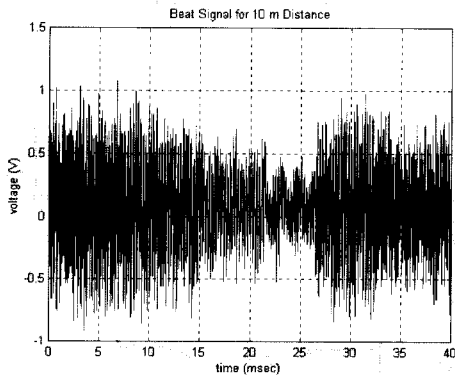


그림 7. 측정거리 10.188 m에 대한 시간영역 IF 신호
Fig. 7. Time-domain IF signal for the distance of 10.188 m.

(BPF)로써 대역 통과시킨 시간영역 신호와 스펙트럼 신호를 그림 9와 10에 도시하였다. 그림 9에서 6 msec까지의 신호가 미약하게 나타난 것은 YTO의 tuning speed가 낮아서 발생한 현상이다. 그림 10에서 불필요한 간섭신호를 제거할 수 있음을 알 수 있으며, 스펙트럼 피크를 보이는 비트 주파수는 3815.625 Hz이다. 이것을 식 (1)을 사용하여 거리로 환산하면 10.000 m가 된다. 여기서 안테나까지의 지연거리 1.924 m가 고려되었다.

이상과 같은 절차로써 1~40 m의 거리를 1 m 간격으로 측정한 결과를 그림 11에 보였다. 그림 12는 각 측정 거리에 대한 오차를 그림으로 표시한 것이

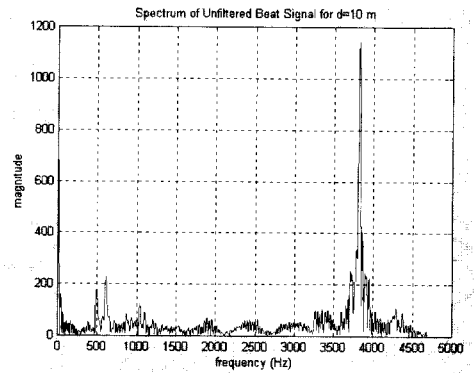


그림 8. 10.188 m의 측정거리에 대한 IF 신호 주파수 스펙트럼
Fig. 8. Spectrum distribution of IF signal for the distance of 10.188 m.

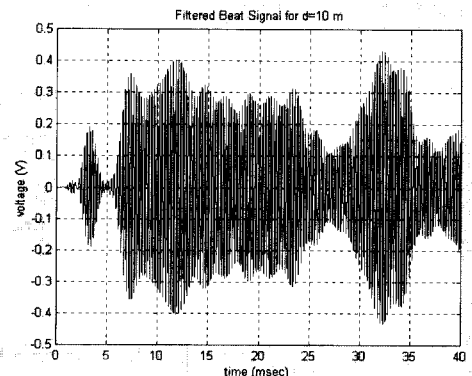


그림 9. 그림 7의 신호를 대역통과 필터시킨 신호
Fig. 9. Band-passed result of the signal shown in Fig. 7.

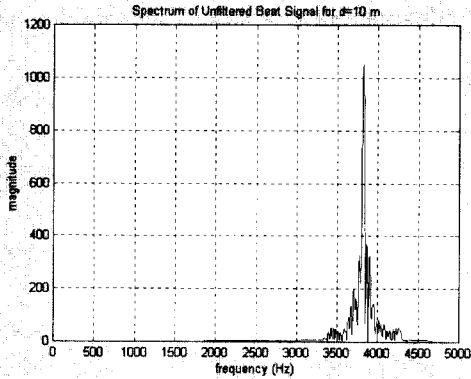


그림 10. 대역통과된 신호의 스펙트럼 모양(10.188 m)
 Fig. 10. Spectrum distribution of the band-passed signal(10.188 m).

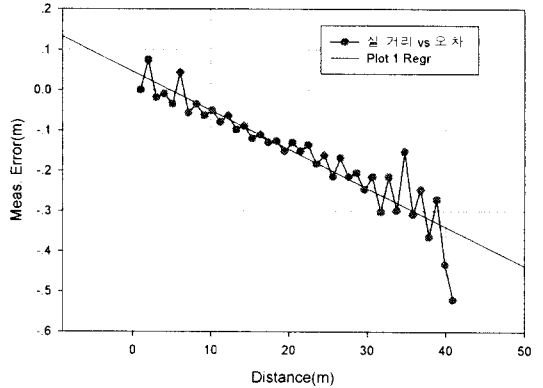


그림 12. 그림 11의 결과에 대한 측정오차
 Fig. 12. Measurement error for the result of Fig. 11.

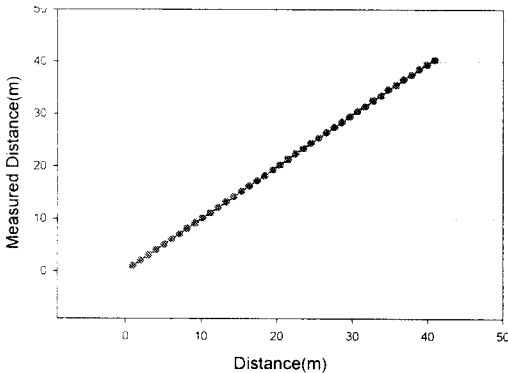


그림 11. 거리 1 m의 간격으로 측정된 실험 결과
 Fig. 11. Experimental results measured with 1 m distance step.

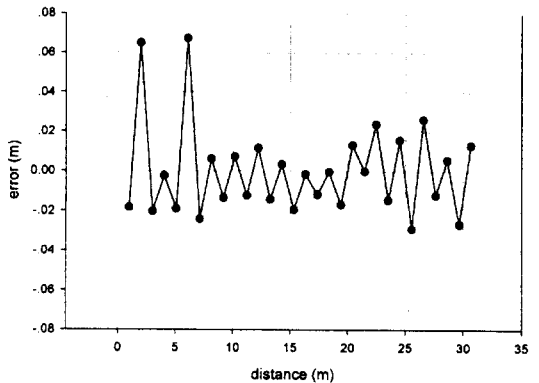


그림 13. 오차 보정을 실시하였을 경우의 측정오차
 Fig. 13. Measurement error under error-correction.

다. 이 그림에서 측정오차를 curve fitting하여 오차 수정을 실시하면 그림 13의 결과를 얻을 수 있다. 이 오차 수정 방법은 거리계의 특성을 사전에 측정함으로써 교정에 적용할 수 있다. 그림 12로부터 제작된 YTO 거리계는 측정오차가 거의 선형적으로 누적됨을 알 수 있다. 이 누적오차를 평균이 0이 되도록 교정하였을 경우, 표준편차 2.33 cm를 얻을 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 YIG 발진기를 사용한 FM-CW 레이다 거리계를 제작하였다. YIG 발진기는 주파수 선형성이 우수하여 벵클터 발진기에서와 같은 선형

보상회로를 필요로 하지 않는다. 중간주파 신호의 시간영역 측정 데이터에 대역통과 필터를 적용시킴으로써 주변 장애물에 의한 간섭신호를 제거할 수 있음을 보였으며, 이것은 실제 산업 현장에서 운용시 알람(alarm) 기능 등의 부가적 기능 설정에도 이용될 수 있다.

제작에 사용된 YIG 발진기의 변조 대역폭은 2 GHz이며, 1~40 m 측정범위를 갖는 야외 시험장에서 거리를 측정할 결과, 표준편차 2.33 cm를 갖는 측정 데이터를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 제작된 마이크로파 거리계는 제철소의 용선 운반 차량과 같이 사람이 접근하기 어려운 산업 시설에서 거리측정용으로 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] M. Nowogrodzki, R. Kipp, D. Mawhinnery, "Radar Instruments: Sensors for Industrial Applications," *RCA Engineers*, vol. 27, no. 5, pp. 23-29, Oct., 1982.

[2] H. Meinel, "Commercial Applications of Millimeterwaves History, Present Status, and Future Trends," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* vol. 41, no. 7, pp. 1639-1653, July, 1995.

[3] M. Nalezinski, M. Vossiek, P. Heide, "Novel 24 GHz FMCW Front-End with 2.45 GHz SAW Reference Path for High-Precision Distance Measurements," *1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 185-188, 1997.

[4] B. Woche, T. Pfendler, H. Pfitzner, "Method and Apparatus Utilizing Time-Expanded Pulse Sequences for Distance

Measurement in a Radar," US Patent 4, 132, 991, Jan., 1979.

[5] B. Woche, T. Pfendler, "Method and System for Increasing the Distance Which Can Be Unambiguously Measured by a Radar System," US Patent 4, 203, 112, May, 1980.

[6] 전중창, 김정목, 임종수, "마이크로파 거리계의 VCO 비선형성에 의한 시스템 특성 분석 및 개선 방안 연구," 1998년도 대한전자공학회 추계 종합학술대회논문집, vol. 21, no. 2, pp. 331-334, 1998. 11.

[7] 전중창, 김정목, 임종수, "FM-CW 레이더에서 비트신호의 스펙트럼 상관성을 이용한 거리 계산 알고리즘 연구," 1999년도 춘계 마이크로파 및 전파 학술대회논문집, vol. 22, no. 1, pp. 376-379, 1999. 5.

[8] M. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, 1980.

[9] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, pp. 239-250, 1975.

김 정 목



1992년 8월: 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 1995년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
 1994년 12월~현재: 포항산업과학연구원 센서계측연구팀 선임연구원

[주 관심분야] 계측시스템 설계, 마이크로프로세서 응용 계측시스템, 마이크로파회로 시스템

임 종 수



1982년 2월: 서울대학교 물리학과(공학사)
 1984년 2월: 한국과학기술원 물리학과(공학석사)
 1997년 2월: 포항공과대학교 물리학과(박사과정 수료)
 1997년~현재: 한남대학교 물리학

과 박사과정
 1984년 3월~1988년 2월: (주) 큐닉스 응용시스템연구소, 기획실, 과장
 1988년 3월~현재: (재)포항산업과학연구원 책임연구원
 [주 관심분야] 고온초전도체 물성평가, 비파괴시험(자분탐상, 누설자속탐상, 초음파탐상), 전자초음파(EMAT) 센서 디자인, 온라인 자동계측시스템 개발, 실시간 디지털 신호처리 기법

전 중 창



1984년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
1995년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)
1995년 3월~1997년 2월: 한국통신

연구개발본부 무선통신연구소 선임연구원

1997년 3월~현재: 위덕대학교 정보통신공학과 조교수
[주 관심분야] 마이크로파 공학, 안테나 공학, 마이크로파소자 수치해석, 마이크로파 계측시스템, 무선이동통신

안 광 호

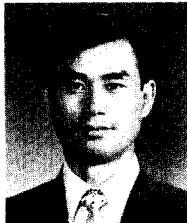


1995년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
1997년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
1997년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
1995년 2월~1997년 12월: 포항 산

업과학연구원 위촉연구원

[주 관심분야] 반도체 소자제작 및 모델링, RF, 마이크로파회로설계

김 태 수



1987년 8월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1991년 3월: 일본 요코하마국립대학교 전자정보공학과(공학석사)
1995년 3월: 일본 요코하마국립대학교 전자정보공학과(공학박사)
1996년 3월~현재: 위덕대학교 정

보통신공학과 조교수

[주 관심분야] 회로이론, 디지털신호처리

이 승 학



1959년 3월: 서울대학교 문리대 물리학과(이학사)
1968년 9월: 미국 펜실베이니아 주립대학교 고체과학대(공학박사)
1968년: 영국 사우샘튼대학 물리학과 튜토
1972년: 미국 일리노이대학 전기공

학과 조교수

1980년: 웨스팅 하우스 ATL FELLOW

1989년: IEEE Senior Member

1989년: 국제상사 부사장

1991년~현재: (주) 엘티아이, 사장

[주 관심분야] 반도체소자, RF, 마이크로파회로설계