능동안테나의 발진주파수 편이에 의한 소형 거리 센서

윤기호*

Compact Range Detection Sensor by Oscillation Frequency Deviation of an Active Antenna

Gi-Ho Yun*

요 약

본 논문에서는 고주파 발진회로의 공진기가 안테나로 동작하는 2.4GHz 대역의 능동 안테나를 이용하여 이동체의 거리를 측정할 수 있는 소형 도플러 센서를 제안하였다. 이동체의 움직임에 비례하여 고주파 발진주파수의 편이를 발생시키며 이를 검출하는 회로를 통해 제안된 구조의 동작을 확인하였다. 설계·제작된 거리 감지 센서는 직경이 30mm, 높이 4.2mm 정도로 매우 작은 원형디스크 형태를 갖으며, 안테나는 2.35GHz에서 약 120도의 빔폭과 전방향 방사특성을 나타내었다. 센서의 감도 측정결과, 1m 떨어져 움직이고 있는 도체판에 대해 약 240mV의 도플러 신호 전압을 얻었고, 자유낙하 실험으로부터 지표위의 5m 지점에서부터 지표면까지 선형적인 전압크기의 증가를 보였다.

ABSTRACT

In this paper, a compact doppler sensor with oscillator type active antenna operating at 2.4GHz frequency band is proposed to measure the distance to a moving object. The oscillation frequency is shifted depending on approaching of the object, and a detection circuit discriminates the frequency deviation. The active antenna has been designed and simulated. The prototype fabricated has a small circular disk type of diameter 30mm and height 4.2mm. As for antenna performance, broadside radiation pattern with beamwidth of 120° and oscillation frequency of 2.35GHz has been measured. Test results as a range sensor shows that signal voltage of about 240mV has been obtained for conducting plate moving 1 meter away from the sensor. And, signal voltage has been linearly increased to the ground from 5m height by free-falling the sensor.

키워드

도플러 센서, 능동안테나, 발진기, 주파수 편이

Key word

Doppler sensor, Active Antenna, Oscillator, Frequency Deviation

* 정회원 : 성결대학교 정보통신공학부 (ghyun@sungkyul.ac.kr)

접수일자 : 2010. 08. 03

심사완료일자 : 2010. 11. 03

I. 서 론

도플러신호를 이용한 거리 센서는 의료용, 산업용 제어장치, 군사용 및 보안시스템 등에 널리 사용되어 왔다. 또한 다양한 응용에 적용되면서 작고 성능이 우수한 장치의 필요성이 대두되었으며 이를 위한 연구가 진행되었다[1][2]. 그러나 간단한 도플러 레이더 송수신 시스템 들조차도 대부분 일반적인 양방향 송수신 시스템 구조에서 벗어나지 못해 소형화에 한계를 노출하고 있다. 그림 1에서 최근까지 사용돼왔던 전형적인 소형 송수신 시스템 구성을 보여준다[3]. 발진기(oscillator)신호를 안테나로 송신하고 이동체에 의해 반사된 수신신호를 혼합기(Mixer)에서 위의 발진 신호와 혼합하여 기저대역 신호를 얻어낸 후, 증폭 및 여파(filtering)하여 이동체의 거리정보를 얻어낸다. 그러나 이러한 구조는 고주파 신호처리를 위해 발진기, 혼합기, 방향성 결합장치(directional coupler)와 안테나 등이 요구되며 경우에 따라서 고주파 증폭장치 등이 추가되기 때문에 회로 크기를 소형화하는 데 한계가 있다.

본 연구에서는 기존의 송수신 구조와는 다르게, 안테나 방사체로 사용되는 공진기를 고주파 트랜지스터의 정궤환(positive feedback) 소자로서 병렬로 연결하여 고주파 발진회로를 구성하는 능동발진 안테나를 설계하였으며, 이를 기반으로 도플러 신호를 검출하여 이동체의 거리를 측정하는 새로운 방식을 제안하였다. 즉, 근접 또는 원거리에 있는 이동체의 이동이나 여타 변화는 안테나를 통해 공간상에 방사된 발진 주파수 편이로 표현되며 검출회로에서 이의 도플러 신호를 얻어낸다.

그림 1. 전형적인 소형 도플러 센서의 회로 구조
Fig. 1 Typical blocks of a compact doppler sensor

본 연구의 구성은 2장에서 제안된 구조의 동작이론과 설계를, 3장에서 실험결과들을 제시하여 분석하였고, 4장에서 결론을 기술하였다.

II. 본 론

본 연구에서 제안된 소형 도플러 거리센서의 구조는 그림 2와 같다. RF 트랜지스터와 발진을 위한 정궤환 소자로 사용되는 공진기(resonator)는 병렬로 연결되었다. 이 공진기는 발진회로의 발진주파수를 결정하는 역할과 패치(patch)안테나의 방사체 기능을 겸하고 있다. 즉, RF 트랜지스터와 방사체를 이용하여 2GHz 대역의 고주파 발진신호를 발생시키며, 안테나로서 이동체가 있는 공간상에 에너지를 방사시키는 능동발진 안테나를 구현한다. 이는 근역장(near field) 또는 원역장(far field)에 위치한 물체의 이동에 따라 발진주파수 편이(deviation)가 형성된다. 발진 주파수의 편이 폭과 변화속도는 능동안테나에 연결된 주파수 변별기(discriminator)에서 전압신호로 변화로 바뀌며 이는 도플러 신호를 나타낸다. 주파수 변별기는 그림 2와 같이 저역통과여파기(LPF)와 포락선 검파기(envelop detector)로 구성된다. 주파수 변별기의 출력인 도플러신호는 이동체와의 거리나 움직임 특성을 나타내며 도플러신호 처리기(processor)에서 필터링 또는 증폭되는 과정을 거친 후 최종 출력된다.

그림 2. 제안된 소형 거리센서의 개략적인 구조
Fig. 2 Block diagram of a proposed range sensor

2.1 능동발진안테나의 설계

고주파 증폭기에 공진기를 정궤환 시킨 발진기의 일반적인 구조를 그림 3에서 보여준다. 증폭기 이득은 입력신호(v_i)의 크기(A)와 공진기의 공진주파수(ω_0)의

함수인 이득 $G(A, \omega_0)$ 로 표시되고, 공진기의 전달함수는 $\beta(\omega)$ 로 표현된다. 이들의 곱은 케환 루프를 개방시켰을 때의 루프이득(loop gain)이며, $G(A, \omega_0)\beta_0 > 1$ 이라면 정제환 폐루프 상에서 루프를 돌때마다 진폭은 커지게 될 것이다. 따라서 개방루프 이득 $G(A, \omega_0)\beta_0$ 의 위상이 0인 공진주파수 ω_0 에서 $|G(0, \omega_0)\beta(\omega_0)| > 1$ 이 되면 발진을 발생시킬 수 있게 되고 궁극적으로 평형 조건에 도달한다. 이는 케환회로에서 신호를 발생시키기 위한 Barkhausen criteria으로서 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \angle G(A, \omega_0)\beta(\omega_0) &= 0 \\ |G(A, \omega_0)\beta(\omega_0)| &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

그림 3. 정제환에 의한 고주파 발진 구조
Fig. 3 Oscillation scheme by positive feedback

그림 3에서 고주파 발진회로에 적용되는 공진기는 전자파 전력을 공간에 방사하는 방사체로서 안테나 특성을 나타낼 수 있어야 한다. 이동체의 위치나 움직임을 충분히 포착할 수 있도록 가급적 넓은 전 방향 지향성을 나타내야 하고 소형 도플러 센서에 적합한 구조이어야 한다. 이를 위한 방사체 설계에 있어서 본 연구에 적합한 2 포트(port) 패치 구조를 그림 4에 제안하였다. 그림 4 방사체는 전통적인 마이크로스트립 사각패치의 내부에 정사각형 빈 공간을 두고 이를 45도 회전한 구조이다[4]. 방사체 내부에 사각형 빈 공간을 둬으로써 방사체를 기구물에 고정하기 위한 지지대를 삽입할 수 있을 뿐 아니라 방사체내의 전류 경로를 증가시켜 안테나를 소형화시킬 수 있다. 또한 방사체의 다이아몬드 형 구조는 모서리의 개방종단(Open end)들 사이에 전류 경로를 길게 하여 임피던스 정합을 용이하게 한다[5]. 방

사체의 급전은 프로브 급전(probe feeding) 방식이며, 급전 부 주위에 원형 gap을 두어 급전선로에 따른 인덕턴스 성분을 상쇄하고 광대역 임피던스 특성을 얻어 낼 수 있게 하였다. 상용 툴(tool)인 Ansoft designer를 이용하여 시뮬레이션 한 결과, 그림 5에 2포트 방사체의 반사 특성(S11)과 전송특성(S21)을 보여준다. 2.48GHz를 중심으로 약 120MHz의 10dB 임피던스 대역폭을 나타내 패치안테나로서 5%정도의 우수한 광대역 특성을 보여주고 있으며, 약 350MHz 범위에서 3dB 대역폭을 갖는 대역통과 여파기 특성을 나타내고 있어 넓은 주파수 범위에서 식 (1)의 발진조건을 만족하게 하는 환경을 제공한다.

그림 4. 2-포트 방사패치 구조
Fig. 4 Geometry of 2 port radiator

그림 5. 방사체의 반사(S11)과 전송(S21) 시뮬레이션
Fig. 5 Simulated reflection and transmission(S21)

그림 6은 무한 접지면을 가정하고 원거리 방사패턴에 대한 시뮬레이션 결과들이다. E면 방사패턴은 약 90°, H면 방사패턴은 약 130°의 빔 폭을 나타낸다. 급전구조와 위치에 따라 다른 빔 폭을 보여준다. 이득은 약 0dBi이며, 입출력 포트가 2개이므로 상대방 포트의 로딩(loading)에 의해 이득이 줄어들었다.

그림 6. 방사체의 방사패턴의 시뮬레이션결과
(점선은 E면, 실선은 H면)
Fig. 6 Simulated radiation pattern of a radiator
(dotted line: E plane, solid line: H plane)

그림 7. 개방루프의 전달특성 시뮬레이션결과
(a) 이득 (b) 위상특성
Fig. 7 Simulated transfer characteristics of open loop
(a) gain (b) phase

능동 발진기에 적용될 고주파 증폭기에 필요한 능동 소자로 Philip사의 BFG540WR를 이용하였다. 이는 2.4GHz 대역 근처에서 10dB 이상의 잠재 이득을 가지므로 이 주파수 대역에서 발진이 가능하다. 설계된 증폭기의 출력단에 공진기를 연결하여 2 포트 회로망을 구성하

며 개방루프 상태를 유지한 후 식(1)의 발진 조건을 확인한다. 그림 7에 개방루프의 전달특성과 위상특성을 보여준다. 발진이 예상되는 2.4GHz 대역 주파수에서 약 2dB 정도의 이득을 가지며 위상이 0°에 근접하고 있다.

발진기를 구성하기 위해 증폭기의 출력 단(collector)과 입력 단(base) 사이를 공진기로 연결하여 그림 8처럼 정제환 방식의 페 루프를 형성한다. 하모닉발란스(harmonic balance) 기법에 따른 비선형 시뮬레이션(simulation)을 실행함으로써 발진 신호에 대한 최종 주파수 스펙트럼을 얻어내고 주파수를 확인한다. 그림 9는 시뮬레이션을 통해 얻어진 발진신호의 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 2.38GHz에서 약 8dBm의 출력을 나타내는 발진기 기본주파수를 확인할 수 있다.

그림 8. 공진기와 결합된 궤환 발진회로
Fig. 8 Feedback oscillation circuit combined with a resonator

그림 9. 발진회로의 주파수 스펙트럼
Fig. 9 Simulated frequency spectrum of the oscillator

2.2 도플러신호의 검출회로 설계

안테나의 방사에너지가 분포되어 있는 근접 또는 원거리 영역에서 존재하는 물체의 재료나 크기 등에 따라 임피던스를 비롯한 방사특성들이 변화된다[6][7]. 특히, 그림 10(a)과 같이 안테나의 방사체가 발진기 구성요소

인 공진기로 사용되어 발진주파수를 결정하는 구조에서는 방사체 주변의 이동체(moving object)의 움직임이 방사체의 입력임피던스를 변화시켜 발진주파수의 편이를 가져온다.

그림 10. 이동체 접근에 따른 능동발진안테나의 주파수 편이에 대한 개념도
(a) 방사체 내의 이동체 움직임, (b) 등가회로
Fig. 10 Oscillation freq. deviation over moving object in the oscillator type active antenna
(a) mobile object under the field (b) equivalent circuit

그림 10(a)에서 캐패시터(C_1, C_2), RF transistor 및 전송선로 T_1 은 발진기의 능동회로들을 상징적으로 표시한 소자들이며, 입력 임피던스 Z_{in} 은 A-A' 단자에서 방사체(또는 공진기)를 바라본 임피던스이다. 그림 10(b)에서는 이동체의 움직임에 따라 방사체 Z_{in} 의 변화를 등가적으로 표현하였다. Z_{in} 의 변화는 식(1)에서 주어지는 발진조건의 공진기 전달함수($\beta(\omega)$)를 변화시켜 발진주파수의 천이(deviation) 현상을 가져온다. 이는 그림 11(a)에서 살펴볼 수 있다. 즉, 이동체의 접근에 따라 발진주파수 천이 폭이 변하고, 접근 속도에 따라 주파수 편이 속도가 달라지는 도플러 특성을 능동 발진안테나의 발진 신호가 나타내고 있다. 그림 11(a)에서는 능동발진 안테나가 발진 중심주파수(f_0)를 중심으로 f_1 에서 f_2 까지 이동한 것을 보여주며 이의 주파수 변화를 전압크기 등으로 변화시키기 위해서 그림 11(b)와 같이 저역통과 필터의 차단경사면을 이용하게 되면 주파수 변별 능력을 갖게 된다. 이때 필터종류는 중요하지 않으며 필터의 차단경사가 예리한 특성을 가져야 주파수변별 능력이 향상된

다. 능동발진안테나의 출력 단자에 그림 12처럼 도플러 신호의 검출회로를 연결하였다.

그림 11. (a) 발진기의 주파수 천이현상
(b) 저역통과 필터를 이용한 주파수 변별
Fig. 11 (a) frequency deviation of the oscillator
(b) frequency discrimination by a low pass filter

그림 12. 도플러 신호 검파회로의 블록 구조
Fig. 12 A block diagram of doppler signal detector

그림 12에서 좌측의 RF signal은 이동체의 움직임을 반영하여 발진 주파수가 천이된 능동발진 안테나 출력 신호이다. 인덕터(L_1)와 2개의 캐패시터(C_0, C_1)로 구성되는 저역통과여파기(LPF)의 차단영역의 기울기(slope)에 따라 주파수변화가 전압크기 변화로 전환된다. 이때 필터의 차단기울기가 중요한데 구성소자들의 높은 Q(quality factor)값이 요구된다. 필터출력은 포락선 검파기를 통해 도플러 신호로 검출된다. 이들 저역통과 여파기와 포락선검파기에 의해 일종의 주파수변조 신호에 대한 주파수 변별 기능을 수행한다. 포락선검파기 출력 신호는 최종단의 OP Amp를 이용한 능동 필터(filter)회로에서 전압신호크기가 증폭되며 잡음이 제거된다.

III. 제작 및 실험 결과

제작된 무선 도플러 센서의 보드별 사진을 그림 13에 나타내었다. 그림 13(a)는 마이크로스트립 선로를 이용

한 패치 구조의 방사체로 유전율 6.15, 기판높이 3.2mm 인 Taconic 사의 보드를 사용하였다. 그림 13(b)는 높이 1mm 인 경계적인 FR4 보드를 사용하여 고주파 발진회로와 도플러 신호의 검출을 위한 회로들이 구현되었다. 이들은 모두 원형구조로 직경이 30mm 이며, 이들 사이의 연결은 0.5mm 직경의 와이어를 이용한 프로브(probe) 급전방식이다. 그림 14에서는 고정용 플라스틱 지지대를 이용하여 2개의 보드를 기구(mechanical housing)에 체결하여 제작한 무선 도플러 센서의 사진을 볼 수 있다.

그림 13. 제작된 시제품의 보드별 조립사진
(a)방사체, (b)회로부(발진회로 및 검파회로)
Fig. 13 Photos of the fabricated proto
(a) radiator board, (b) circuit board

그림 14. 기구부와 능동발진안테나 조립 사진
Fig. 14 Photo of circuit boards assembled with housing

방사체 보드와 회로보드는 접지면이 공유되도록 2쌍의 프로브(probe) 연결 점들을 통해 back to back 연결을 하고 있다. 능동발진 안테나의 방사특성은 간이 무반사실 ($5.1 \times 4.1 \times 2.5 \text{ m}^3$)에서 실험하였다. 그림 15의 (a)와 (b)에 E 면과 H 면의 전 방향(broadside) 방사패턴에 대해 측정한 결과를 보여준다. 약 120도의 3dB 빔폭을 나타내며 시뮬레이션 결과와 유사하다. 또한 안테나 소형화를 위해 접지 면을 줄인 결과, 그림 15(a)에서 후방 방사량이 커진 것

을 볼 수 있다. 전체 이득은 약 0dBi로서 역시 시뮬레이션 결과와 유사하다.

그림 15. 안테나의 방사특성 측정결과
(a) E-plane, (b) H-plane
Fig. 15 Measured radiation pattern
(a) E-plane, (b) H-plane

그림 16. 제작된 발진기의 발진신호 측정결과
Fig. 16 Measured oscillation waveform

그림 16은 능동발진안테나의 발진 특성을 측정된 결과이다. 출력이 작은 것은 고주파 발진회로의 출력 단자가 별도로 없어 공간상의 전력을 간접 측정하였기 때문이다. 발진 주파수는 설계 결과와 근사한 2.353GHz에서 발진하였다. 제작된 무선 도플러방식의 거리 센서(이하 도플러 센서라 약칭함)의 특성은 실험 및 측정환경 등을 고려하여 다음 2가지 방식으로 측정되었다. 먼저 도플러 센서를 특정위치에 고정시키고 이동체를 나타내는 일정크기(20×20cm²)의 도체 판을 이동하는 방식과, 도플러 센서를 도체 망(mesh)위에서 자유 낙하시키는 방식을 이용하였다. 먼저 도플러 센서를 고정시키는 방식은 그림 17과 같이 간이 무반사실에서 실험하여 외부 간섭신호를 최대한 억제하였다. 20×20cm² 크기의 도체판을 이동시켜 거리 변화에 따른 도플러 센서의 감도를 확인한다. 이를 위해 고정된 도플러 센서와의 이격거리(D) 0.5m와 1m 사이에서 전·후 왕복한다. 도플러 신호 주파수의 시간축 파형을 측정하였고 그림 18에서 D=0.5m 일 때 그 결과를 나타냈다. 시간축 파형을 통해 속도계산도 가능하다. 또한 스펙트럼(spectrum)분석기를 이용하여 고주파 발진신호의 주파수편이(deviation)를 측정하였다. 그림 18에서 파형의 첨두치(peak)들 사이 값이 도플러 신호 크기다. 표 1에 도플러 센서를 고정시켜 측정된 도플러 신호의 크기 측정결과를 정리하였다. 이때 발진주파수는 약 2.35GHz이다. 0.5m와 1m 두 지점 사이의 도플러 전압신호 크기와 주파수 편이 차이가 확연히 구분되는 것을 알 수 있으며, 발진 주파수 편이가 클수록 비례하여 도플러 신호 전압이 커지는 것을 알 수 있다.

두 번째로 도플러 센서를 자유낙하시켜 도플러 신호를 측정하기 위해 지표면에 8×8m² 크기를 갖는 도체 망을 놓고 바로 위의 9미터 높이에서 자유 낙하시킨다. 이때 도플러 센서 출력단에 X-Y plotter를 연결하여 도플러 신호를 측정한다.

낙하시험을 통해 측정된 출력 결과를 그림 19에 나타내었으며 그림에서 가로축은 시간 변화를 나타내며 지표면으로부터 거리를 도플러 신호파형위에 직접 표기하였다. 그림에서 센서가 지면에 접근할수록 신호의 크기가 커지는 것을 알 수 있다. 그림 20에 이를 다시 지표면 높이에 대한 도플러 신호를 전압으로 표시하였으며 지표면 높이 5미터 이하로는 거리에 따른 선형성도 어느 정도 확보하고 있다.

그림 17. 무반사실 내의 측정환경
Fig. 17 Test setup in the anechoic chamber

그림 18. 측정된 도플러 신호의 시간축 파형
Fig. 18 Time axis waveform of measured doppler signal

표 1. 도플러신호 측정결과(도플러센서 고정)
Table 1. Measured doppler signal magnitude

편파방식	센서와의 거리(D)	발진주파수 편이	도플러 신호크기
	0.5m	500KHz	360mV
	1m	400KHz	240mV

그림 19. 자유낙하시 도플러신호 크기 측정결과
Fig. 19 Doppler signal magnitude measured during free fall

그림 20. 접지면 거리에 따른 도플러 신호 크기
Fig. 20 Doppler signal magnitude over distance from ground

IV. 결 론

본 연구에서는 이동체의 거리를 측정하는 소형 무선 도플러 센서를 제안하였다. 도플러 신호 감지를 위한 정제된 고주파 발진회로와 패치 안테나를 결합시켜 소형화된 능동 발진안테나를 설계하였고 도플러 검출회로와 결합된 시스템 구현을 통해 동작을 확인하였다. 설계·제작된 능동발진 안테나는 2.35GHz에서 약 120도의 빔폭을 가지며 전방향 방사특성을 나타내었다. 또한 2개의 보드들이 결합되어 제작된 무선 도플러 센서는 직경이 30mm, 높이 4.2mm 정도로 매우 작은 크기를 갖는다. 한편 센서의 감도 측정결과 이동체를 나타내는 도체판이 1m 떨어져 있을 때 최소 240mV의 도플러 신호전압이 측정되었고, 무선 도플러 센서를 자유 낙하시켰을 때 지표상의 5m 높이에서 아래로 선형적인 전압크기의 증가를 보였다.

그러나 제안된 도플러 센서가 이동체와의 접근 거리나 기타 움직임들을 정확하게 얻어내기 위해서는 고주파회로 원거리 감도개선과 선형성의 확대 및 도플러 신호를 검출하는 신호처리회로 기법이 개선되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] R.H.Rasshofer and E.M. Biebl, "A Direction Sensitive, Integrated, Low Cost Doppler Radar Sensor for Automotive Appl.," IEEE MTT-S Digest, pp.1055-1058, 1998
- [2] J.Y. Lee, K.B. Lee and S.H. Choi, "A design of motion detecting sensor using microwave," Proceeding of APMC 2007, pp.1-4, 2007
- [3] 한석균, "차량감지용 FMCW 레이더의 단일평형 다이오드 주파수혼합기 설계및제작," 한국전자과학회 논문지, 제14권, 제12호, pp.1335-1340, 2003.
- [4] Wen-Shyang Chen, "Single feed dual frequency rectangular microstrip ant. with square slot", *Electronic Letters*, Vol.34 No.3, Feb. 1998
- [5] 윤기호, "UHF RFID Reader용 사각환형 소형능동 안테나," 한국전자과학회논문지, 제18권, 제3호, pp.315-322, 2007
- [6] D. M. Dobkin and S. M. Weigand, "Environmental Effects on RFID Tag Antennas," IEEE MTT-S Intl Microwave symposium digest, pp. 135-138, 2005
- [7] T. Onishi and K. Ito, "Consideration on the Characteristics of Antennas Close to Lossy Objects," IEEE AP International symposium, vol. 1, pp. 440-443, 2002

윤기호(Gi-Ho Yun)

1984년 연세대학교
전자공학과(공학사)
1986년 연세대학교
전자공학과(공학석사)

1999년 연세대학교 전자공학과(공학박사)
1985년~1997년 :삼성종합기술원, 삼성전기
1997년~2008년 호남대학교 부교수
2009년~현재 성결대학교 조교수
※관심분야: 무선통신 회로, 부품 및 시스템