

계단 주파수 변조된 펄스 도플러 기법을 이용한 고해상도 전방 충돌 회피용 차량 레이다 성능 분석

High Resolution Forward-Looking Collision Avoidance Automotive Radar Using Stepped-Frequency Pulsed-Doppler(SFPD) Technique

우 성 철 · 광 영 길

Sung Chul Woo · Young Kil Kwag

요 약

전방 감시 차량용 레이다에서 표적 거리와 속도 정보를 얻기 위해서는 일반적으로 주파수 변조된 연속파형(FMCW)이나 펄스 도플러(PD) 파형을 사용하고 있다. 그러나 고해상도의 표적 정보를 얻기 위해서는 펄스 폭이 매우 좁고 넓은 대역폭을 사용하여야 하므로 상대적으로 높은 첨두 전력이 필요하고 고속의 디지털 변환 처리 속도가 요구된다. 본 논문에서는 계단 주파수 변조된 펄스 도플러 파형을 이용하여 고해상도의 표적 정보를 획득할 수 있는 SFPD(Stepped-Frequency Pulsed-Doppler) 처리 기법을 제시한다. 제안된 SFPD 기법은 시뮬레이션을 통하여 기존의 FMCW 및 펄스 도플러 파형 방식과 비교 분석하였다. 본 기법은 필요에 따라서 거리 및 도플러 해상도를 가변할 수 있는 장점이 있기 때문에 이론적으로 고해상도의 표적 영상 형성이 가능하여 향후 정밀한 차량 충돌 방지를 위한 표적 식별에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract

A forward-looking automotive radar typically utilizes the frequency modulated continuous wave(FMCW) or pulsed-Doppler waveform for the information acquisition of the target range and velocity. In order to obtain the high resolution target information, however, a narrow pulse width and wide bandwidth are inherently required, thus resulting in high peak power and high speed digital converter processing. In this paper, a stepped-frequency pulsed-Doppler(SFPD) waveform algorithm is proposed for high resolution forward looking automotive radar application. The performance of the proposed SFPD waveform technique is analyzed and compared with the conventional FMCW and PD method. Since this technique can be used for the high resolution target imaging with arbitrary range and Doppler resolution, it is expected to be useful in automotive radar target classification for the precision collision avoidance applications in the future.

Key words : Automotive Radar, Stepped-Frequency Pulsed-Doppler Waveform, FMCW, Collision Avoidance

I. 서 론

일반적으로 차량용 레이다에서는 전방 차량 표적의 거리와 속도 정보를 얻기 위하여 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 또는 펄스 도플러

파형을 주로 많이 사용한다. FMCW 레이다 방식은 하드웨어 구성이 간단하여 가격이 저렴하지만 송수신을 위해 두 개의 안테나가 필요하여 그에 따른 안테나 사이의 간섭이 발생한다. 독일의 Bosch사는 200 m의 탐지거리, 1 m의 거리 해상도를 지원하

한국항공대학교 항공전자공학과(Department of Avionics Engineering, Korea Aerospace University)

· 논문 번호 : 20090529-15S

· 수정완료일자 : 2009년 8월 24일

는 FMCW 차량용 레이더를 개발하였으며, 최근 탐지거리를 250 m까지 증가시킨 3세대 차량용 레이더인 LRR3를 개발하였다^[1]. 하지만 FMCW의 탐지거리 및 해상도는 모두 대역폭에 관련이 있으며, 무엇보다 주파수 변조의 선형성이 해상도에 가장 큰 영향을 끼치게 된다^[2]. 펄스 도플러 레이더 방식은 펄스 변조된 파형을 이용하여 고해상도의 표적의 거리 및 속도 정보를 획득할 수 있으나, 펄스폭이 매우 좁고 넓은 대역폭을 사용하여야 하므로 상대적으로 높은 침투 전력이 필요하고 고속의 디지털 변환 처리 속도가 요구된다. 독일의 Continental Temic사는 150 m의 탐지거리, 3.75 m의 거리 해상도를 지원하는 펄스 도플러 차량용 레이더를 개발하였으며, 현재 1 m의 거리 해상도까지 지원 가능한 3세대 차량용 레이더인 ARS300을 개발하였다^[3]. 본 논문에서는 계단 주파수 변조된 펄스 도플러 파형을 이용하여 고해상도의 표적 정보를 획득하는 SFPD (Stepped-Frequency Pulsed-Doppler) 처리 기법을 제시한다. 기존의 계단 주파수를 사용하여 속도 및 거리를 탐지하는 방법은 레이더 중심 주파수를 변경하거나 또는 계단 주파수가 변경된 다양한 파형을 여러 개 사용하여 위상차에 따른 속도를 유추하는 방법이 있으나, 이 방법은 차량용 레이더에 적용하기에는 하드웨어적인 면에서 복잡하며, 그에 따라 가격적인 측면에서도 부적합하다^{[4],[5]}. 본 논문에서는 우선 FMCW 및 펄스 레이더 모델을 이용한 표적 신호처리 기법을 비교하며, 본 논문에서 제안하는 SFPD 기법에 대한 수학적 모델을 설명하고 펄스 도플러 방식의 레이더 파라미터를 이용하여 전방 차량의 거리와 속도 정보를 얻기 위한 신호처리 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과를 비교 분석한다.

II. 전방 감시 차량용 레이더 파형

2-1 FMCW 레이더 파형

기본적인 FMCW 레이더 신호처리 구성도는 그림 1에 도시되었으며, 측정된 수신 신호는 송신부에서의 VCO 신호와 곱해지게 된다.

곱해진 후의 신호는 식 (1)과 같이 표현되며, 이 식에서 비트 주파수 f_b 를 구할 수 있다.

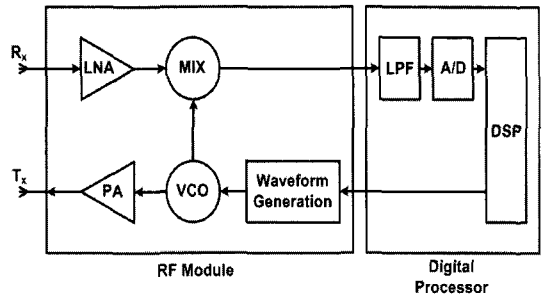


그림 1. FMCW 레이더 구성도
Fig. 1. FMCW radar diagram.

$$S(t) = \frac{A_c^2}{2} \left[\begin{aligned} &\cos \left\{ (2\omega_c - A_b T_p)t + A_b t^2 + \left(\frac{A_b}{2} T_p^2 - \omega_c T_p \right) \right\} \\ &+ \cos \left\{ (A_b T_p)t + \left(\omega_c T_p - \frac{A_b}{2} T_p^2 \right) \right\} \end{aligned} \right] \quad (1)$$

여기서 T_p 는 신호 왕복시간(round-trip time)이며, A_c 는 신호 세기, A_b 는 주파수 변화율의 크기를 나타낸다. 식 (1)에서 첫 번째 항은 선형적으로 증가되는 FM 칩 신호에 대한 성분이고, 이것은 LPF에 의해 필터링되며, 두 번째 항은 비트 주파수에 대한 성분이다. 표적과의 거리 및 거리 해상도는 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{cT_d}{2BW} f_b \quad (2)$$

$$\Delta R = \frac{cT_d}{2BW} \Delta f_b = \frac{c}{2BW} \quad (3)$$

여기서 T_d 는 표적 관측 시간(dwell time), BW 는 주파수 sweep 대역폭을 나타낸다. FMCW 차량용 레이더의 성능을 비교하기 위하여 적용한 레이더 파라미터는 표 1에 제시하였으며, 레이더 주파수 및 해상도는 ITU-R 권고 및 Bosch사의 해상도를 참고하였다^{[1],[6]}. 그림 2는 식 (1)을 이용한 FFT 결과로서 비트 주파수 f_b 를 도식한 것으로 비트 주파수는 약 20 kHz이며, 식 (2)를 이용하면 표적과의 거리는 144 m가 되며, 식 (3)에 의한 거리 해상도는 1 m가 된다. 즉, 탐지거리 측면에서의 이점을 보기 위해서는 상대적으로 주파수 sweep 대역폭이 좁아야 한다.

하지만 거리 해상도를 향상시키기 위해서는 주파수 sweep 대역폭이 넓어야 하는 상대적인 변수 제한이 있다. 그림 3은 주파수 sweep 대역폭에 대한 탐지

표 1. FMCW 차량용 레이더 파라미터

Table 1. The parameter of FMCW automotive radar.

Parameter	Specification
Frequency	76.5 GHz
Bandwidth	0.15 GHz
Dwell time	7.2 ms
Detection range	144 m
Range resolution	1 m

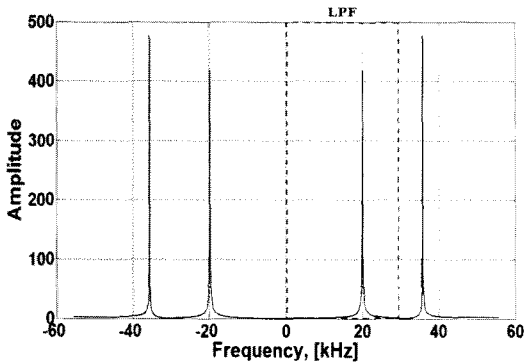
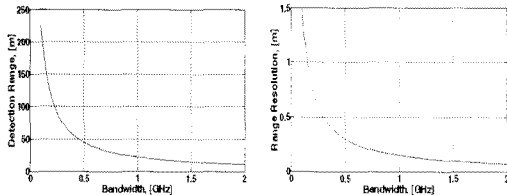


그림 2. 탐지된 표적 도플러 비트 주파수
Fig. 2. Detected beat frequency.



(a) 탐지 거리 (a) Detection range
(b) 거리 해상도 (b) Range resolution

그림 3. 주파수 sweep 대역폭에 대한 탐지 거리 및 거리 해상도

Fig. 3. Detection range and range resolution based on frequency sweep bandwidth.

거리 및 거리 해상도를 도식한 것이다. 주파수 sweep 대역폭이 0.15 GHz보다 넓어지면 탐지 거리는 150 m 이하로 내려가게 되며, 거리 해상도는 1 m 이하로 향상되는 것을 확인할 수 있다.

2-2 펄스 도플러 레이더 파형

펄스 도플러 레이더 신호처리 구성도는 그림 4에

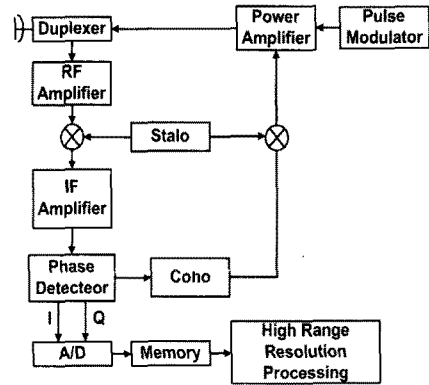


그림 4. 펄스 도플러 레이더 구성도
Fig. 4. Pulsed-Doppler radar diagram.

표 2. 펄스 도플러 차량용 레이더 파라미터

Table 2. The parameter of pulsed-Doppler automotive radar.

Parameter	Specification
Frequency	76.5 GHz
Transmitter power	10 mW
Pulse width	6.7 nsec
PRF	71 kHz
Number of pulse	512
Receiver noise	7 dB
Detection range	150 m
Range resolution	1 m

도시되어 있다. 표 2는 Continental Temic사에서 1 m의 해상도와 150 m의 탐지거리를 만족하기 위해 제시한 펄스 도플러 차량용 레이더 파라미터로서 펄스 도플러 파형을 이용한 레이더의 성능 비교를 위해 사용한 레이더 파라미터이다.

그림 4는 FMCW와는 다르게 송/수신기가 하나로 되어 있으며, Stalo를 통해 RF 주파수에서 IF 주파수로 변화시켜주며 Coho를 통해 위상 측정을 위한 레퍼런스 코히어런트 펄스를 발생시켜준다.

그림 5는 거리 130 m에서 상대속도 10 m/s, 4 m²의 RCS를 가지는 표적 1과 거리 100m, 상대속도 20 m/s, 5 m²의 RCS를 가지는 표적 2를 거리와 펄스 영역에서의 FFT 과정을 통하여 거리와 도플러 영역으로 도식한 것이다. 표적 1의 도플러 주파수는 5 kHz

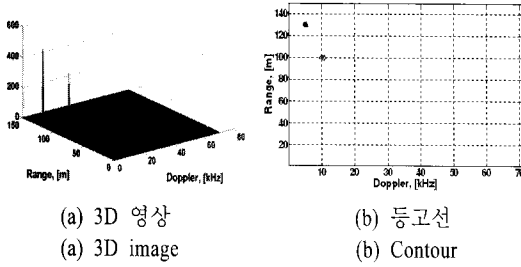


그림 5. 거리-도플러 영역에서의 표적 신호
Fig. 5. The target signals in range-Doppler domain.

로서 상대속도는 약 10.03 m/s, 표적 2의 도플러 주파수는 10 kHz로서 상대속도는 약 20.09 m/s로 비교적 정확한 속도를 얻을 수 있다. 하지만 1 m의 비교적 고해상도의 거리정보를 획득하기 위해서는 6.7 ns의 매우 좁은 펄스폭을 요구하게 된다. 이 경우, 매우 좁은 펄스폭에 따른 고속의 디지털 변환처리 속도가 요구되므로, A/D 변환기의 하드웨어적인 부담이 증가하게 된다.

III. 계단 주파수 변조된 펄스 도플러 레이다

3-1 차량용 레이다 신호 모델

상대적으로 넓은 펄스폭을 가지면서 고해상도 표적 정보를 획득할 수 있는 계단 주파수 변조된 펄스 도플러 차량용 레이다 신호처리 알고리즘을 제시한다. 계단 주파수 레이다 구성도는 그림 6과 같다. 동

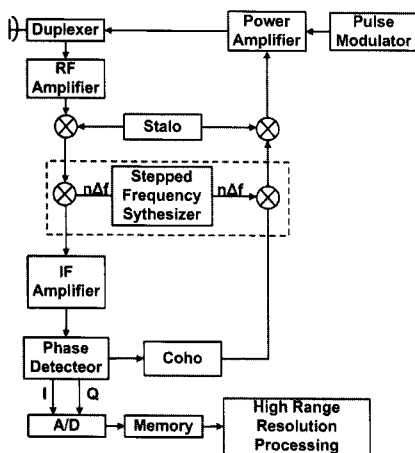


그림 6. 계단 주파수 레이다 구성도
Fig. 6. Stepped-frequency radar diagram.

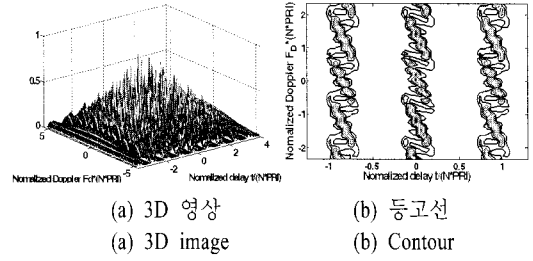


그림 7. 계단 주파수 파형의 모호성 함수
Fig. 7. The ambiguity function of stepped-frequency waveform.

작 원리는 일반적인 펄스 도플러 레이다와 유사하지만 여기에서는 계단 주파수를 이용하여 임의의 다수의 펄스를 송신하고 수신하므로 표적 정보의 해상도를 가변할 수 있다.

그림 7은 전형적인 계단 주파수 파형의 모호성 함수를 나타낸다. 그림 7에서 보는 바와 같이 매우 높은 거리 해상도를 얻을 수 있으나, 거리-도플러 커플링 영향에 의해 정확한 거리 정보를 얻기 어려운 점이 있다. 그러나 높은 PRF를 사용하면 도플러 모호성을 피할 수 있으므로 단거리의 차량용 레이다에 적용하는 것에 있어 높은 PRF 설정에 따른 거리 모호성은 큰 문제가 되지 않는다.

계단 주파수의 수신 신호는 식 (4)로 표현되며, I/Q 채널과 LPF를 통과한 I/Q 출력 신호는 식 (5)와 식 (6)으로 표현된다. 각각의 변수는 식 (7)에서 식 (9)로 정리된다.

$$A \cos 2\pi(f_0 + n\Delta f) \left(t - \frac{2R}{c} \right) = A \cos \left[\{ 2\pi(f_0 + n\Delta f) \} t - 2\pi(f_0 + n\Delta f) \frac{2R}{c} \right] \quad (4)$$

$$I_channel = A \cos \left[-2\pi \cdot f_N \cdot \frac{2R_{NM}}{c} \right] = A \cos \left[2\pi \cdot f_N \cdot \frac{2R_{NM}}{c} \right] \quad (5)$$

$$Q_channel = A \sin \left[-2\pi \cdot f_N \cdot \frac{2R_{NM}}{c} \right] = -A \sin \left[2\pi \cdot f_N \cdot \frac{2R_{NM}}{c} \right] \quad (6)$$

$$f_N = f_0 + (N-1)\Delta f \quad (7)$$

$$R_{NM} = R_0 - (V_r \cdot t_{NM}) \quad (8)$$

$$t_{NM} = (NM-1)PRI + \frac{2R_0}{c} + \frac{T_p}{2} \quad (9)$$

여기서 n 은 집적된 전체 펄스의 개수이며, N 은 수신

된 펄스의 순서, M 은 버스트 순서를 나타낸다. T_p 는 펄스폭이며, f_0 는 레이더 주파수, Δf 는 계단 주파수, V_r 는 표적 상대속도, t_{NM} 은 샘플링 시간을 나타낸다.

3-2 SFPD 신호처리 알고리즘

계단 주파수 파형을 이용한 차량용 레이더 수신 모델은 다음 식 (10)으로 표현할 수 있다.

$$\phi_n = -4\pi f_N \cdot R_{NM} / c = \frac{-4\pi f_0 \cdot R_0}{c} + \frac{-4\pi(N-1)\Delta f \cdot R_0}{c} + \frac{4\pi f_0 \cdot V_r t_{NM}}{c} + \frac{4\pi(N-1)\Delta f \cdot V_r t_{NM}}{c} \quad (10)$$

SFW는 Δf 가 증가되어 송신을 하게 되어 수신된 펄스마다 도플러 성분이 달라 일반적인 펄스-도플러 신호처리로는 표적의 속도를 구할 수 없다. 또한 식 (10)에서 상대속도 V_r 에 관련된 식의 3, 4번째 부분은 속도성분에 의한 거리-도플러 커플링에 의해 정확한 거리 역시 구할 수 없게 된다. 따라서 SFW 신호처리에서의 속도 측정 알고리즘 및 정확한 표적 거리 측정을 위한 속도 보상이 필요하다. 본 논문에서 제시하는 계단 주파수 펄스-도플러 전방 감시 차량용 레이더의 신호 처리 과정은 그림 8 및 그림 9와 같다. 그림 8(a)와 그림 9(a)는 차량 속도 측정 신호 처리부로서, 16개의 버스트에서 동일한 주파수를 가지게 되는 부분을 추출한 후 FFT 과정을 통해 주파수 대역에서의 도플러를 관찰하여 상대속도를 측정하게 된다^[7]. 그림 8(b)와 그림 9(b)는 차량 거리 측정 신호 처리부로서 각각의 펄스가 일정한 계단 주파수만큼 증가된 16개의 펄스를 누적한 후 앞의 속도 측정 신호 처리부에서 측정된 상대속도를 이용하여 속도 보상을 해주게 되며, IFFT 과정을 통하여 차량 간의 거리를 측정하게 된다.

그림 9(a)의 같은 주파수를 가지는 첫번째 펄스-거리 영역을 추출하는 동안 다른 주파수 영역인 $N-1$ 개의 펄스-거리 영역은 사용하지 않게 되므로 펄스-거리 영역을 재구성한 후에는 결과적으로 설정된 PRI의 N 배의 PRI를 가지게 된다. 그러므로 PRF는 작아지게 되며, 이로 인하여 도플러 영역에서 상대속도 측정 가능 범위가 좁아져 기존 펄스-도플러 신호처리보다 높은 PRF를 가지도록 설정해 주어야 한다. 하지만 비행기나 미사일 등의 빠른 속도를 가진

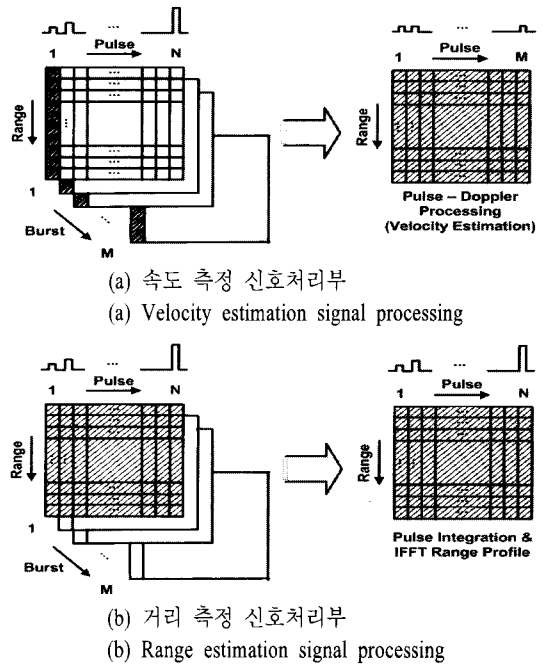
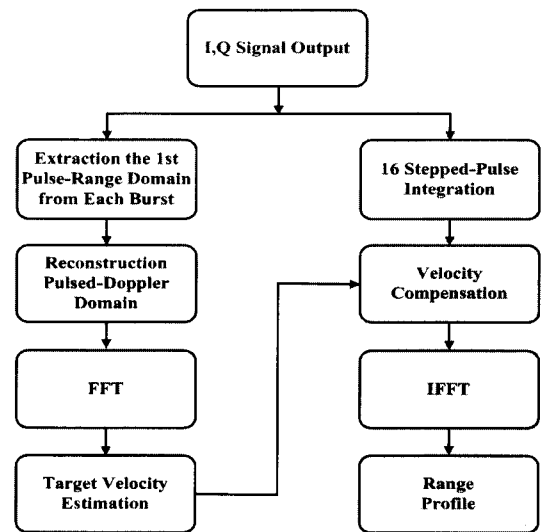


그림 8. 계단 주파수 펄스 도플러 신호처리 알고리즘
Fig. 8. Stepped-frequency pulsed-Doppler signal processing algorithm.



(a) 속도 측정 신호처리부 (b) 거리 측정 신호 처리부
(a) Velocity estimation signal (b) Range estimation signal processing

그림 9. 계단 주파수 펄스 도플러 신호처리 알고리즘 구성도
Fig. 9. Stepped-frequency pulsed-Doppler signal processing algorithm block diagram.

표적을 탐지하는 일반 레이더와 달리 차량용 레이더에서의 표적 속도 범위는 매우 낮으므로 PRF 설정에 있어 큰 영향을 미치지 않게 된다.

IV. 시뮬레이션 및 성능 분석

본 논문에서 제안하는 SFPD 기법을 적용한 전방 감시 차량용 레이더의 표적 탐지 성능을 분석하기 위하여 표 3에서 설정한 레이더 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 도플러 레이더와 동일한 중심 주파수, 전송 출력, 탐지거리 및 수신기 잡음을 가지도록 설정하였다.

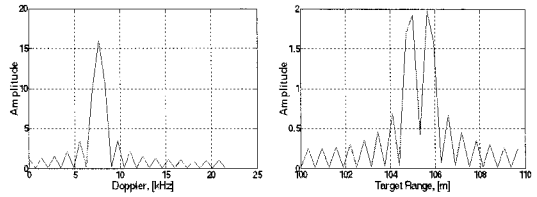
그림 10(a)는 그림 8(a)의 속도 측정 신호 처리부를 이용하여 상대속도 15 m/s, 4 m²의 RCS를 가지는 표적 1의 도플러 주파수를 나타낸 것이며, 그림 10(b)는 추출한 상대속도를 그림 8(b)의 차량 거리 측정 신호 처리부에 보상한 후 펄스 누적 및 IFFT 과정을 거쳐 상대속도 5 m/s, 5 m²의 RCS를 가지는 표적 2와 비교하여 거리 해상도를 확인한 것이다. 그림 11은 펄스폭이 증가함에 따른 탐지거리와 송신 출력 관계를 도식한 것으로, 펄스폭이 50 ns일 때, 1 mw의 송신 출력으로 약 300 m의 탐지거리를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

표 4는 앞에서 소개한 FMCW, 펄스 도플러 CPT (Coherent Pulse Train) 및 계단 주파수 SFW의 시뮬레

표 3. 계단 주파수 펄스 도플러 차량용 레이더 파라미터

Table 3. The parameter of stepped-frequency pulsed-Doppler automotive radar.

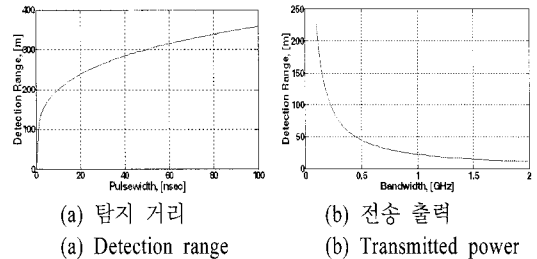
Parameter	Specification
Frequency	76.5 GHz
Stepped frequency	15 MHz
Transmitter power	10 mW
Pulse width	50 nsec
PRF	355 kHz
Pulse, burst number	16, 16
Receiver noise	7 dB
Detection range	150 m
Range resolution	0.625 m



(a) 표적 1의 도플러 주파수 (b) 0.625 m 거리 해상도
(a) Doppler frequency of target 1 (b) 0.625 m range resolution

그림 10. 도플러 주파수 및 거리 해상도

Fig. 10. Doppler frequency and range profile.



(a) 탐지 거리 (b) 전송 출력
(a) Detection range (b) Transmitted power

그림 11. 펄스폭에 대한 탐지 거리 및 전송 출력

Fig. 11. Detection range and transmitted power based on pulse width.

이션 결과를 비교한 것이다. FMCW 레이더의 거리 해상도는 대역폭에 관련되므로 고해상도를 위해서는 매우 넓은 대역폭이 필요하나, 이것은 150 m보다 좀 더 먼 거리의 표적을 탐지하기에는 적합하지 않다.

펄스 도플러 신호 처리에서는 비교적 정확한 거리 및 속도 정보를 획득할 수 있으나, 매우 좁은 펄스폭을 요구하게 되므로 높은 첨두 전력과 고속의 디지털 변환기의 처리속도를 요구하게 되는 단점이 있

표 4. 레이더 파형에 따른 파라미터

Table 4. The parameter based on radar waveform.

Parameter	FMCW	CPT	SFW
Detection range	150 m	150 m	150 m
Range resolution	1 m	1 m	0.625 m
Band width	0.15 GHz	0.15 GHz	0.24 GHz
Dwell time	7.2 ms	7.2 ms	0.72 ms
Pulse width	-	6.7 ns	50 ns
PRF	-	71 kHz	355 kHz

다. 그러나 SFPD 파형을 이용한 전방 감시 차량용 레이다에서는 펄스 수와 계단 주파수 대역 폭을 임의로 조절이 가능하므로 비교적 기존의 펄스 도플러 레이다와 비교하여 볼 때 비교적 넓은 펄스 폭과 좁은 대역폭을 가지고도 원하는 해상도를 가변적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 시뮬레이션을 통하여 기존의 펄스 도플러 방식에서는 1 m의 거리 해상도를 얻기 위해 약 6.7 ns의 펄스폭이 필요하였으나, 제안된 SFPD 기법에서는 약 7.5배 넓은 50 ns의 펄스폭으로도 0.625 m의 높은 거리 해상도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

V. 결 론

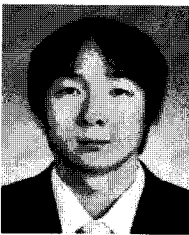
본 논문에서는 고해상도의 전방 감시 차량용 레이다에 적용할 수 있는 계단 주파수 변조된 펄스 도플러 기법을 제안하였다. 제안된 SFPD 레이다 파형을 이용하면 상대적으로 넓은 펄스폭과 좁은 대역폭을 가진 파형을 사용하여도 고해상도 표적 탐지 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 시뮬레이션을 통하여 기존의 FMCW 및 펄스 도플러 파형 레이다와 비교 분석하였다. 본 기법은 필요에 따라 거리 및 도플러 해상도를 가변할 수 있는 장점이 있기 때문에 이론적으로 고해상도의 표적 영상 형성이 가능하므로 향

후 정밀한 차량 충돌 방지를 위한 표적 식별에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] http://rb-k.bosch.de/en/safety_comfort/driving_comfort/driverassistancesystems/lrr3.html.
- [2] G. M. Brooker, "Understanding millimetre wave FMCW radars", *1st International Conference on Sensing Technology*, p. 153, 2005.
- [3] S. Damiani, REPOSIT D2.1, *State-of-the-art of current Collision Avoidance Systems*, p. 26, 2008.
- [4] Y. Haotian, C. Zhen, W. Shuliang, and P. Jun, "Study on radar target imaging and velocity measurement simultaneously based on step frequency waveform", *AP SAR2007*, pp. 404-407, 2007.
- [5] P. V. Genderen, "Multi-waveform SFCW radar", *33rd European Microwave Conference*, pp. 849-852, 2003.
- [6] *ITU-R Recommendation M.1452*, "Transport information and control systems-low power short-range vehicular radar equipment at 60 GHz and 76 GHz", 2000.
- [7] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, McGraw-Hill, pp. 253-254, 2005.

우 성 철



2007년 2월: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 (공학사)
 2007년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] Radar Signal Waveform, Radar Signal Processing, UWB Radar

곽 영 길



1976년 2월: 한국항공대학교 항공통신공학과 (공학사)
 1981년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1987년 6월: 미국오하이오대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 1976년 3월~2001년 3월: 국방과학연구소 책임연구원, 레이다 및 SAR 연구실장
 1997년 2월~1999년 2월: 영국 Matra Marconi Space 위성 SAR 프로젝트 책임자
 2001년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수 및 대학부설 항공전자연구소 소장 역임
 2002년 4월~2008년 12월: 한국전자과학회 레이다연구회 위원장
 2007년 9월~2008년 8월: 영국 옥스퍼드대학교, Dept. of Engineering Science, 방문교수, UWB Radar 연구
 [주 관심분야] Radar System Design, Radar Signal Processing, Synthetic Aperture Radar Processing, UWB Antenna & UWB Radar Imaging