

새로운 레이더 성능지표를 이용한 FMCW 레이더 간섭 시뮬레이션 모델

FMCW Radar simulation model with interference using a new radar performance parameter

문 상 곤* 박 승 근** 양 훈 기*** 천 창 울**** 정 용 식***** 배 경 빈*****
(Sang-Kon Mun) (Seung-Keun Park) (Hoon-Gee Yang) (Chang-Yul Cheon) (Young-Seek Chung) (Kyung-Bin Bae)

요 약

지능형 교통 시스템(ITS : Intelligent Transport Systems)은 원활한 교통 흐름과 자동차의 주행 안전성을 위해 활발히 연구가 진행되고 있는 분야이다. 이를 위한 차량간의 거리 측정 센서로 최근에는 밀리미터파를 이용한 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더가 활발히 연구되고 있다. 실제로 미국, 유럽 및 일본에서는 이미 47, 60, 77, 94, 139 GHz 등이 차량의 레이더용 주파수로 할당되어 있다. 하지만 이러한 차량용 FMCW 레이더는 주변의 다른 레이더의 신호로부터 간섭을 받게 되어 성능이 저하되는데 본 논문에서는 이런 FMCW레이더의 주변 간섭에 대한 영향을 분석하기 위해 FMCW레이더 및 간섭 상황을 모델링하고 이를 시뮬레이션 하였다. 본 연구에서는 레이더에 적용되던 기존의 성능 분석 지표인 PD(Probabilities of Detection)와 PFA(Probabilities of False Alarm) 이외에 거리 오차 정보를 반영하는 레이더 성능 분석 파라메타로 RER(Range Error Rate)을 제안하고 시뮬레이션을 통해 유용성을 검증 하였다. 제안된 RER 파라메타는 차량용 레이더 시스템에 있어 외부간섭신호에 의한 거리 오차에 대한 성능평가 지표로 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract

ITS(Intelligent Transport System) has been researched actively to guarantee the smooth traffic and the safety of the vehicle. In recent, as the sensor for the measurement of distance between vehicles, the FMCW radar system in millimeter wave band has been interested in ITS. Actually, 47, 60, 77, 94 and 139 GHz have been assigned for the vehicle radar frequencies in Europe and Japan. However, the performances of the FMCW radar are deteriorated due to the interferences from the surrounding radars and mobile devices. In this paper, in order to model and simulate the performance of FMCW radar under the exterior interference, we propose a new performance parameter, RER(Radius Error Rate), which contains the information of the range error due to the interferences, and show the effectiveness of the proposed parameter.

Key words : RER, ITS, FMCW, radar, interference

† “본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.”

* 주저자 : 광운대학교 전자융합공학과

** 공저자 : 한국전자통신연구원

*** 공저자 : 광운대학교 전자융합공학과

**** 공저자 : 서울시립대학교 전기전자컴퓨터 공학부

***** 공저자 : 광운대학교 전파공학과

***** 공저자 : 국방과학연구소

† 논문접수일 : 2011년 3월 29일

† 논문심사일 : 2011년 6월 23일

† 게재확정일 : 2011년 6월 24일

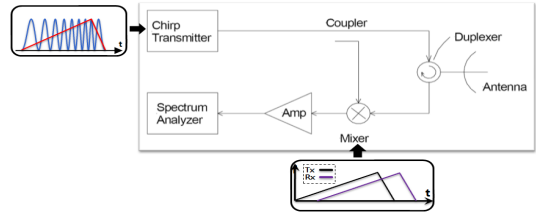
I. 서 론

지능형 교통정보 시스템(ITS : Intelligent Transport System)은 원활한 교통 흐름과 자동차의 주행 안전성을 위해 현재 활발히 연구가 진행되고 있는 분야이다. 특히 차량의 충돌방지 레이더는 ITS에 거리 정보를 제공하는 기본 센서로서 전방 및 측방의 장애물을 인식하고 거리를 측정하여 충돌을 방지하는 것을 목적으로 하는 중요한 부품이다. 이를 위해 초음파, 레이저, 영상 카메라 등이 사용되고 있으나 안개나 우천 등의 주변 환경에 따라 성능의 변화가 심하고 구조가 복잡하기 때문에 최근에는 밀리미터 파를 이용한 레이더 구조가 많이 제안되고 있다. 실제로 미국 및 유럽, 일본에서는 이미 47, 60, 77, 94, 139 GHz 등이 차량용 레이더 주파수로 사용되고 있다[1-3]. 이러한 차량용 레이더의 주목적은 주변 장애물과의 거리를 측정하는 것이다. 하지만 이러한 차량용 레이더는 주위의 이동통신 신호와 다른 차량의 레이더 신호에 대해서 간섭을 받게 되고 이는 차량용 레이더가 추정한 목표물과의 거리정보에 오차를 일으키게 되는데 간섭에 따른 FMCW 레이더의 간섭 영향분석의 기존 연구가 미흡한 편이다. 본 연구에서는 이러한 주위의 간섭신호 환경에서 차량용 레이더의 거리추정에 대한 영향분석을 실시하였고 이를 위하여 새로운 오차추정 파라메타인 RER(Range Error Rate)을 제안하고 그 유용성을 시뮬레이션을 통해서 보였다.

II. 본 론

1. FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더

일반적으로 ITS를 위한 레이더로는 FMCW 형태가 가장 많이 사용된다. 이는 구조가 간단하고 소형화가 가능하여 상대적으로 저렴한 가격으로 구성될 수 있기 때문이다. FMCW 레이더의 구조 및 원리는 <그림 1>과 같다. 신호발생기(Chirp-Transmitter)에서 시간에 따라 주파수가 변하는 FM(Frequency



<그림 1> FMCW 레이더의 구조
<Fig. 1> Structure of FMCW radar

Modulated)신호를 생성한다. 이후 신호를 안테나를 통해 방사하고 장애물로부터 재 반사되는 신호를 다시 수신 한다. 이후 주파수 혼합기(Mixer)를 통해 송신한 신호와 수신한 신호의 주파수 차이를 검출한다.

고성능의 신호 분석기를 사용할 경우에는 저역 통과 필터가 필요 없을 수 있으나, 대부분 소형 시스템에서는 주파수의 차이만을 필요로 하므로 주파수의 차이만을 통과 시키는 저역통과 필터를 주파수 혼합기(Mixer)뒤에 위치시킨다. 실제 본 논문의 시뮬레이션에서도 주파수 혼합기(Mixer)이후에 저역 통과 필터를 거치는 것으로 모델링 하였다.

수신된 신호는 장애물과의 거리에 따라 그에 상응하는 일정한 시간 지연을 갖는다. 전파의 이동 속도는 공기 중에서 빛의 속도와 매우 근사하므로 거리에 대한 시간 지연(τ)과 빛의 속도(C), 장애물과의 거리(R)는 아래 수식 (1) 과 같은 관계를 만족시킨다.

$$\tau = \frac{2R}{C} \quad (1)$$

FMCW 레이더의 FM신호는 단위 시간 동안 주파수 변화율이 일정한 형태이다. 송신한 신호와 수신된 신호의 주파수 차이(Δf), 단위 시간 동안 주파수 변화율(a)은 (2)의 관계를 만족 시킨다.

$$\Delta f = \tau a \quad (2)$$

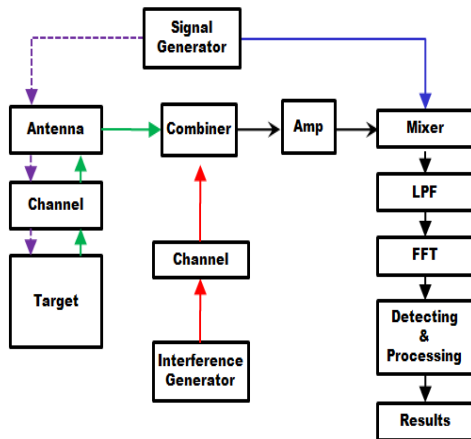
특별히 FMCW 레이더 시스템에서는 Δf 를 Beat Frequency라고 부르기도 한다. 따라서 위의 (1), (2)

의 관계를 알면 최종적으로 주파수 혼합기(Mixer)를 통과한 송신 주파수와 수신 주파수의 차이(Δf)를 통해 거리(R)을 알아 낼 수 있으며 이는 (3)과 같은 관계를 갖는다.

$$R = \frac{\Delta f \cdot C}{2\alpha} \quad (3)$$

2. 시뮬레이션 모델

본 연구에서 사용한 시뮬레이션의 모델은 <그림 2>와 같다. 앞서 살펴본 FMCW의 동작원리를 참고 하였으며 각 블록에 관한 자세한 설명은 <표 1>에 요약하였다. Detection & Processing부는 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 본 시뮬레이션 모델에서는 스펙트럼 분포 중 가장 높은 값을 갖는 주파수를 검출하여 이를 Beat Frequency(송신 신호와 수신 신호와의 주파수 차이)로 인식하는 방법을 사용하였다. Result 블록에서는 최종적으로 추정된 거리 R을 이용하여 시간에 따라 R의 상대 오차를 계산 하였다.



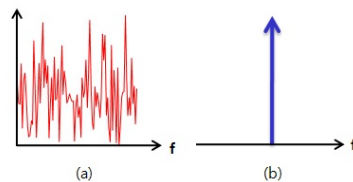
<그림 2> 시뮬레이션 모델
<Fig. 2> Simulation Model

3. 시뮬레이션 결과

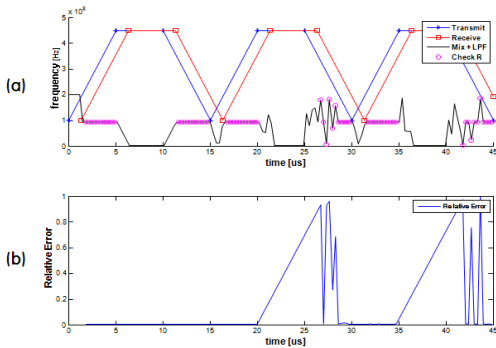
본 논문의 시뮬레이션에서 사용한 간섭 신호의 종류는 <그림 3>과 같다.

<표 1> 시스템 블록별 기능
<Table 1> Function of system block.

이름	기능
Signal Generator	사용자가 설정한 신호를 발생시키고 이를 안테나를 통해 송신한다. 본 논문에서는 주파수 100~450MHz, 주기 15 μ s, α =70[MHz/ μ s] 인 신호를 사용하였다. 자세한 내용은 <그림 4-a>의 송신신호를 참고 바란다.
Channel	송신 및 수신, 간섭 신호가 공기 중을 통과할 때의 변화에 대한 해석을 실시한다. Rician 모델을 사용하였다.
Target Generator	장애물이 레이더(안테나)로부터 떨어져 있는 거리를 설정한다. 이를 통해 수신되는 신호를 생성한다. 본 논문에서는 200m 위치에 장애물이 있는 것으로 모델링 하였다.
Interference Generator	인접해 있는 간섭원에서 발생하는 신호를 생성한다. 시뮬레이션에는 총 2가지 방식의 간섭신호를 생성 및 적용 가능하다.
Combiner	송신된 신호와 간섭 신호를 합쳐주는 기능을 한다.
Amp	송신된 신호를 사용하기 유리하게 증폭시키는 역할을 한다. 본 논문에서는 AGC(Auto Gain Controller)를 통해 송신된 신호와 수신된 신호의 세기를 같게 조절하였다.
Mixer	송신된 신호와 수신된 신호의 주파수 차이를 검출하기 위해 사용된다. 송신된 신호와 수신된 두 코사인 신호의 곱셈으로 모델링 하였다.
Low Pass Filter	Mixer에서 통과한 신호 중 주파수의 차이 성분만을 통과시킨다. 200MHz 이상의 신호를 통과시키는 모델로 설정하였다.
FFT Module	FFT를 통해 현재 신호의 주파수를 분석한다. 샘플링 간격은 10ns 이고, FFT를 위한 샘플 개수는 3072개 이다.
Detecting & Processing	분석한 주파수 정보를 바탕으로 장애물과의 거리를 유추한다.
Results	시뮬레이션 결과를 사용자에게 제공한다.



<그림 3> 간섭 신호의 종류. (a)Gaussian 모델(white noise), (b)단일 주파수모델
<Fig. 3> Interference signal type. (a)Gaussian Model (white noise), (b)Single frequency model



〈그림 4〉 Gaussian 모델의 시뮬레이션 결과 (S/I=-10dB)
 (a) 송수신 신호의 파형 (b) 시간에 따른 Relative Error
 〈Fig. 4〉 Simulation results with Gaussian Model
 (S/I=-10dB). (a) Waveforms of Tx and
 Rx signals, (b) Temporal Relative Error

〈그림4-(a)〉는 간섭원의 형태가 Gaussian 이고, S/I비(Signal to Interference ratio)가 -10dB인 경우의 시뮬레이션 결과이다. 간섭이 있는 경우와 없는 경우를 구분하기 위해 20μs 이후부터 간섭이 발생한 것으로 시뮬레이션 하였다. 그래프 아래쪽에 실선으로 표시된 부분은 Mixer와 Low Pass Filter를 통과한 이후의 신호이다. 간섭이 없을 경우 완만한 형태를 유지하고 있으나 간섭이 존재할 경우 매우 심하게 변동하는 것을 확인 할 수 있다. 이 실선 위에 ‘○’ 모양으로 표시된 부분은 장애물과의 거리(Rest)를 추정하기 위해 신호를 추출한 곳을 나타낸다.

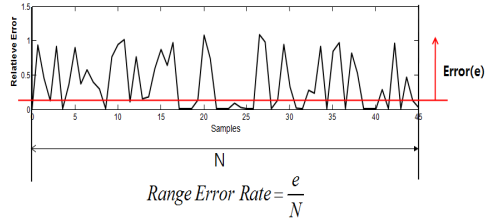
〈그림4-(b)〉는 시간에 따른 Relative Error를 나타내는데 이에 대한 정의는 (4)와 같다.

$$Relative\ Error = \frac{|R_{est} - R|}{R} \quad (4)$$

간섭이 발생한 이후에 거리추정에서 Relative Error가 발생하고 있음을 확인 할 수 있다.

4. 성능 파라메타의 정의

일반적으로 유무선 통신 시스템은 BER(Bit Error Rate) 파라메타를 이용하여 간섭에 따른 성능을 평가 할 수 있다. BER은 전체 수신된 데이터의 비트 중 에러가 난 비트의 비율로 정의된다. 따라서 분석



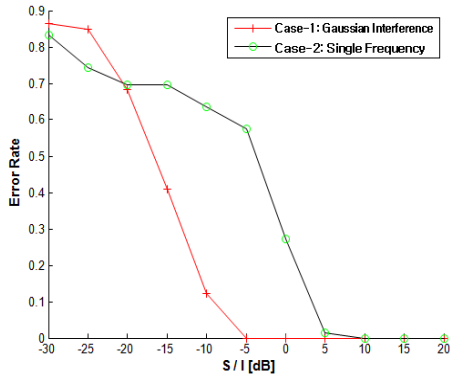
〈그림 5〉 RER(Range Error Rate)의 거동
 〈Fig. 5〉 Change of RER(Range Error Rate)

하려는 시스템이 디지털 통신 체계를 가지고 있어야 한다는 전제 조건이 필요하다. 그러나 일반적인 소형 레이더는 거리(R)을 알아내는 것이 목적으로 아날로그 기반으로 동작하여 이러한 파라메타를 사용할 수 없다. 따라서 BER을 레이더의 성능 분석을 위한 파라메타로 적용하기에는 한계가 있다.

현재 레이더의 성능 지표로는 PD(Probabilities of Detection), PFA(Probabilities of False Alarm)를 사용하고 있다[4]. 그러나 PD와 PFA는 간섭에 따른 추정거리의 오차에 관한 내용이 포함되어 있지 않은, 물체의 검출 유/무에만 관련된 레이더의 성능 지표이다. 따라서 본 논문에서는 이와 달리 레이더의 거리 판별 오차를 반영하는 RER(Range Error Rate)이라는 새로운 성능 분석 지표를 도입하였다.

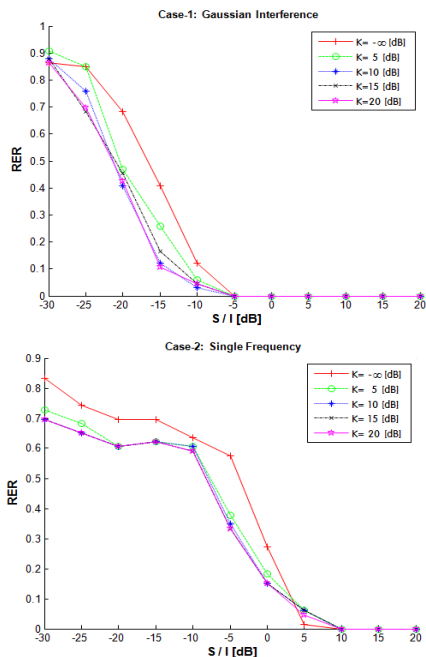
〈그림 5〉는 시뮬레이션 결과로부터 계산된 오차를 보여준다. 이때 가로축은 시간을 나타내며 세로축은 거리에 대한 상대 오차를 나타낸다. 여기서 N은 거리추정을 위한 연산 수행 횟수, e는 오차의 상한선 초과 횟수를 의미한다. 본 논문에서 제안한 RER은 e/N으로 정의되며 이는 외부의 간섭이 감소하면 작은 값을 갖는다. 기존에 연구된 차량용 FMCW 레이더의 사양과 최고속도 및 제동능력을 고려하여 본 연구에서는 RER을 위한 오차의 상한선을 상대오차를 기준으로 10%로 결정하였고 각 시스템의 목적에 따라 상향 혹은 하향 조정 될 수 있을 것이다[5-6].

〈그림 6〉은 -30dB~20dB 범위의 S/I에 대하여 시뮬레이션을 수행하고 얻어진 간섭의 세기에 따른 RER의 변화 모습 이다. 시뮬레이션 수행의 결과 간섭의 세기가 작아질수록 RER이 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Case-1인 Gaussian 형태의 간섭



〈그림 6〉 간섭세기(S/I)에 따른 RER 결과
(Fig. 6) Result of RER according to S/I

은 같은 에너지량을 갖더라도 넓은 범위에 걸쳐 분포하는 스펙트럼의 형태를 갖기 때문에 상대적으로 Case-2의 Single Frequency 모델에 비해서 낮은 스펙트럼을 갖는다. 따라서 원래 추출해야 되는 Beat Frequency를 찾을 수 있는 확률이 더 높아진다. 이런 특성 때문에 시뮬레이션 수행 결과를 보면



〈그림 7〉 K값에 따른 RER 결과. (a) 광대역 모델 (Gaussian Model) (b) 협대역 모델
(Fig. 7) Result of RER according to K factor
(a) Wideband Model (b) Narrow band model

Case-1이 Case-2에 비해 같은 세기의 간섭이 존재할 경우 더 낮은 RER을 갖고 이에 따라 높은 성능을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

실제 전파 환경에서는 전자파가 전파되는 채널의 특성에 따라 RER 성능이 달라질 수 있다. <그림 7>은 채널의 변화에 따른 RER을 나타낸다. <그림 7-(a)>는 광대역 특성에 대한 성능평가를 위하여 Gaussian 모델을 적용한 결과이다. <그림 7-(b)>는 협대역 특성에 대한 성능평가를 위하여 single frequency 모델을 적용한 경우이다.

본 논문에는 Rician 채널 모델을 사용하였는데 K=0일 경우 Rayleigh 채널과 같다. 그래프를 보면 Case-1, Case-2 모두 K값이 커질수록 좀 더 높은 성능을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Rician 채널 모델에서 K값이 커질수록 채널상에서의 감쇠가 감소하기 때문으로 해석된다.

III. 결 론

앞서 살펴본 바와 같이 본 논문에서는 RER(Range Error Rate)이라는 새로운 파라메타를 도입함으로써 FMCW 레이더의 성능을 평가 할 수 있게 되었다. 또한 레이더의 대부분의 기능이 장애물과의 거리(R)을 찾아내는 것임을 고려해 볼 때 이러한 RER이라는 파라메타가 기존 레이더의 새로운 성능 평가 지표로 사용될 수 있음을 확인 할 수 있었다. 이번 연구를 통해 디지털 통신 방식이 아닌 아날로그 방식인 레이더 시스템에서도 PD나 PFA 대신 좀 거리 오차를 반영하는 성능 평가 지표를 도입 할 수 있게 되었으며 이를 통해 추후 레이더 시스템의 표준 제정이나 기타 레이더 성능 분석 연구의 지표로서 RER을 사용 가능 할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

[1] 손홍민, “밀리미터파 자동차 레이더의 개발 동향 및 기술적 과제,” *한국전자과학회, 전자파기술*, vol. 9, no. 4, pp.48-58, 1998. 12.
[2] S. Tokoro, “Automotive application systems of a millimeter-wave radar,” *IEEE Conference on Intelligent Vehicles Symposium*, pp.260-265,

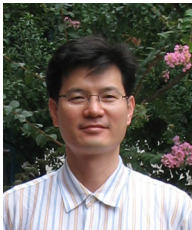
- 1996.9.
- [3] S. Tokoro, K. Kuroda, A. Kawakubo, K. Fujita and H. Fujinami, "Electronically scanned millimeter-wave radar for pre-crash safety and adaptive cruise control system," *IEEE Conference on Intelligent Vehicles Symposium*, pp.304-309, 2003.
- [4] Merrill I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems 3rd Edition," McGrawHill, pp.35-45.
- [5] D. Richardson, "An FMCW Radar sensor for collision avoidance," *IEEE Conference on Intelligent Transportation System (ITSC97)*, pp.427-432, Nov. 1997.
- [6] 오우진, "FMCW방식의 자동차 레이더 신호처부 설계 및 구현," *전자공학회 논문지*, 제 41권, 12호, pp.77-84, 2004. 12.

저자소개



문 상 곤 (Mun, Sang-Kon)

2009년 2월 : 서울 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2011년 2월 ~ 현 재 : 서울 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 주 관심분야 : EMI/EMC 및 RF 수동소자, 레이더 등



박 승 근 (Park, Seung-Keun)

1991년 : 고려대학교 (학사)
 1993년 : 고려대학교 (석사)
 2004년 : 충북대학교 (공학박사)
 1993년 ~ 현 재 : 한국전자통신연구원(ETRI) 책임연구원
 주 관심분야 : 디지털통신, 스펙트럼공학, 전자파환경공학



양 훈 기 (Yang, Hoon-Gee)

1985년 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1987년 : SUNY at Buffalo ECE (공학석사)
 1992년 : SUNY at Buffalo ECE (공학박사)
 1993년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 전파공학과 교수
 주 관심분야 : 무선통신시스템, UWB, RFID, 스펙트럼 공학



천 창 율 (Cheon, Chang-Yul)

1983년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1985년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 1992년 : 미국 University of Michigan, Ann arbor (공학박사)
 1992년 ~ 1995년 : 강원대학교 전기공학과 조교수
 1995년 ~ 현 재 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 정교수
 주 관심분야 : RF, RF Power Amplifier, EMC 등

저자소개



정 용 식 (Chung, Young-Seek)

1989년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1991년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2000년 8월 : 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
2003년 3월 ~ 2006년 2월: 명지대학교 통신공학과 조교수
2006년 3월 ~ 현 재 : 광운대학교 전자공학과 부교수
주 관심분야 : EMI/EMC, Radar 신호처리



배 경 빈 (Bae, Kyung-Bin)

1975년 2월 : 부산대학교 전자공학과 (공학사)
1987년 : 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
1975년 3월 ~ 현 재 : 국방과학연구소 책임연구원
주 관심분야 : 레이더 연구개발