

# QuaDRiGa 클러터 모델을 이용한 도심 환경에서의 FMCW 레이더 시뮬레이터 구현

## Implementation of FMCW Radar Simulator in Urban Environments using QuaDRiGa Clutter Model

현준보 · 조영기\* · 최원석\* · 김해림\* · 남상욱

Joonbo Hyun · Youngki Cho\* · Wonseok Choi\* · Haerim Kim\* · Sangwook Nam

### 요 약

건물이 많이 밀집되어있는 도심 환경에 위치한 수신기에서 송신되는 신호는 scatterer들에 반사되어 다수의 multipath를 형성하고, 수신기에서 direct path뿐만 아니라 multipath 신호들을 수신한다. 이러한 복잡한 환경에서 레이더의 전파 신호의 multipath에 의해 탐지되는 클러터를 이해하는 것은 중요하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 통계적 채널 모델 중 하나인 QuaDRiGa(quasi-deterministic radio channel generator)를 FMCW 레이더 시뮬레이터에 적용하여, 도심 환경에서 생길 수 있는 클러터를 구현하고, SCR(signal-to-clutter ratio) 산출을 통해 클러터가 타겟 탐지에 미치는 영향을 확인하였다.

### Abstract

In a dense urban environment where a receiver is located, the transmitted signal is reflected off the scatterers, thus forming multiple multipath signals, and the receiver retrieves not only the direct path but also the multipath signals. Understanding the clutter detected by radar propagation signals due to multiple paths in such complex environments is important. In this study, we apply quasi-deterministic radio channel generator, which is a statistical channel model, to an FMCW radar simulator to model the clutter that may occur in urban environments. Furthermore, we evaluate the effect of clutter on target detection by calculating the signal-to-clutter ratio.

Key words: FMCW Radar, QuaDRiGa, Multipath, Clutter

### I. 서 론

도심 지역의 확장과 도심 환경의 복잡성이 증가함에 따라, 레이더 신호가 건물 및 각종 장애물에 반사되어 발생하는 클러터의 영향을 이해하는 것이 중요해지고 있다.

복잡한 환경에서 발생하는 multipath 신호를 해석할 수 있는 주요 방법으로 ray-tracing이 있다. 결정적 채널 모델 중 하나인 ray-tracing은 고정된 구조물에 대해 맥스웰 방정식을 해결하는 기하학적 광학을 기반으로 환경 내에서 파동의 전파를 추적하여 전파 채널을 해석하는 모델이다<sup>[1]</sup>.

「이 연구는 초음속 공대지 유도탄 사업(202208D0050M)의 일환으로 국방과학연구소와 LIG넥스원의 지원으로 수행되었음.」

서울대학교 전기·정보공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University)

\*LIG Nex1 미사일시스템핵심기술연구소 1팀(Missile Systems Core Tech R&D (GCU R&D))

· Manuscript received January 10, 2025 ; Revised January 23, 2025 ; Accepted February 25, 2025. (ID No. 20250110-006)

· Corresponding Author: Sangwook Nam (e-mail: snam@snu.ac.kr)

Ray-tracing은 주변 환경의 multipath를 정확하게 해석할 수 있으나, 통계적 채널 모델보다 연산 시간이 많이 소요된다는 특징이 있다<sup>[2]</sup>.

통계적 채널 모델 중 하나인 GSCM(geometry-based stochastic channel model)은 특정 통계 분포에 따라 random 하게 scatterer를 배치 및 산란 특성 할당을 통해 multipath를 해석하며, 결정적 채널 모델인 ray-tracing보다 빠른 해석 속도를 가진다<sup>[3]</sup>. GSCM 기반의 채널 모델은 SCM(spatial channel model), WINNER, METIS 모델 등 다양하게 연구 및 모델링 되었으며<sup>[4]</sup>, 그 중 2013년 Fraunhofer HHI에서 개발한 채널 모델이자 오픈소스 채널 시뮬레이션 프로그램인 QuaDRiGa(quasi-deterministic radio channel generator)는 WINNER 모델을 확장한 채널 모델로<sup>[4]</sup>, 2023년까지 다양한 시뮬레이션 기능이 추가되어 왔다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서는 복잡한 도심 환경에 대해 효율적으로 채널 해석을 할 수 있는 QuaDRiGa를 FMCW 레이더 시뮬레이터에 적용하여, 도심 환경에서 생길 수 있는 FMCW 레이더 클러터를 구현하였다. 사용한 FMCW 레이더 시뮬레이터는 레이더 및 타겟 간의 direct path 신호와 QuaDRiGa로 해석된 multipath 신호에 dechirp, decimation, 1D 및 2D FFT 연산을 적용하고, beat 및 Doppler frequency, 그리고 range-Doppler map을 제공한다. 본 논문에서는 multipath 신호가 존재하지 않는 free space 시나리오와, QuaDRiGa로 해석한 도심 환경에서의 multipath 신호가 존재하는 시나리오를 시뮬레이션 및 비교함으로써 레이더 클러터의 구현을 확인하고, 클러터가 타겟 탐지에 미치는 영향을 SCR(signal-to-clutter ratio) 산출을 통해 확인하였다.

## II. FMCW 레이더

FMCW(frequency-modulated continuous wave) 레이더는 여러 개의 chirp 신호를 송신하고, 타겟에 반사되어 돌아온 chirp 신호들 간의 주파수 차이를 분석하여, 타겟의 거리 및 속도를 추정한다. Sawtooth wave chirp의 시간 도메인에서의 송신신호  $x_{TX}(t)$  및 수신신호  $x_{RX}(t)$ 는 식 (1) 및 (2)와 같이 표현할 수 있다(reference impedance는 1  $\Omega$ 으로 가정).

$$x_{TX}(t) = \sqrt{P_t} \exp(j2\pi[f_c t + \frac{1}{2}\beta t^2]) \quad (1)$$

$$x_{RX}(t) = B \exp(j2\pi[(f_c(t-\tau(t)) + \frac{1}{2}\beta(t-\tau(t))^2)]),$$

$$B = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}},$$

$$\tau(t) = \frac{2R(t)}{c} = \frac{2}{c}(R_0 + vt) \quad (2)$$

$P_t$ 는 peak transmitted power,  $G_t$ 는 송신 이득,  $G_r$ 은 수신 이득,  $\lambda$ 는 신호의 파장,  $\sigma$ 는 타겟 RCS,  $R$ 은 레이더 및 타겟 간 거리이다.  $\tau(t)$ 는 신호가 레이더 및 타겟 사이를 왕복하는 동안 소요된 시간이며, 초기 거리  $R_0$ 와 타겟의 radial velocity  $v$ 로 표현된다.  $f_c$ 는 carrier frequency이고, chirp 주파수 기울기  $\beta$ 는  $\beta = BW/T_c$ ,  $BW$ 는 bandwidth,  $T_c$ 는 chirp time이다.

Beat 신호  $x_{BF}(t)$ 는 송신신호  $x_{TX}(t)$ , 그리고 수신신호  $x_{RX}(t)$ 의 conjugate 간의 곱으로 식 (3)과 같이 유도된다<sup>[6]</sup>.

$$x_{BF}(t) = x_{TX}(t) \overline{x_{RX}(t)}$$

$$\simeq \exp(j2\pi[(f_d + f_r)t + \frac{2R_0 f_c}{c}]) \quad (3)$$

$f_d$ 는 도플러 주파수,  $f_r$ 은 타겟 및 레이더 간 거리에 의해 생성된 주파수이며,  $f_d = 2vf_c/c$  및  $f_r = 2\beta R_0/c$ 이다<sup>[6]</sup>.

$M$ 개의 이산 beat 신호  $x_{BF}[n]$ 는 ADC를 통과하면서 샘플링 주기  $T$ 만큼 샘플링이 이루어지며, 식 (4)와 같이 표현된다.  $x_{BF}[n]$ 에 1D-FFT를 적용하여 산출된  $X_{BF,1D}[k]$ 는 식 (5)와 같이 표현될 수 있고, 스펙트럼  $|X_{BF,1D}[k]|$ 의 peak가 되는  $k$ 는 식 (6)과 같이 산출된다<sup>[6]</sup>.

$$x_{BF}[n] = x_{BF}(nT) = \sum_{m=0}^{M-1} x_{BF,m}(nT) \quad (4)$$

$$X_{BF,1D}[k] = \exp(j2\pi \frac{2R_0 f_c}{c}) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp(j2\pi \frac{f_c v T_c m}{c}) \cdot \exp(j2\pi[(f_d + f_r)Tn - \frac{nk}{N}]) \quad (5)$$

$$k = (f_d + f_r)TN \quad (6)$$

$k$ 에 해당하는 주파수는  $f_k = kf_s/N$ 을 통해 산출, 타겟의 거리는  $R_{f_k} = f_k c / (2\beta)$ 를 통해 산출된다.

$X_{BF,1D}[k]$ 에 두 번째 FFT를 적용하여 산출된  $X_{BF,2D}[p,k]$  식 (7)와 같고, 스펙트럼  $|X_{BF,2D}[p,k]|$ 의 peak가 되는  $p$ 는 식 (8)과 같이 산출된다<sup>[6]</sup>.

$$X_{BF,2D}[p,k] = \exp(j2\pi \frac{2R_0 f_c}{c}) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp(j2\pi [\frac{2f_c v T_c m}{c} - \frac{mp}{M}]) \cdot \exp(j2\pi [(f_d + f_r) T n - \frac{nk}{N}]) \quad (7)$$

$$p = f_d T_c M \quad (8)$$

$p$ 에 해당하는 주파수는  $f_p = pf_s/M$ 을 통해 산출, 타겟의 속도는  $v_{f_p} = f_p \lambda / 2$ 를 통해 산출된다.

### III. QuaDRiGa

QuaDRiGa(quasi-deterministic radio channel generator)는 GSCM(geometry-based stochastic channel model)을 기반으로 한 통계적 채널 모델이자, Fraunhofer HHI에서 제작한 전파 채널 시뮬레이션 프로그램이다<sup>[4],[5]</sup>. QuaDRiGa는 도심(urban) 또는 시골(rural), 그리고 macro-cell 또는 micro-cell 지역의 LSP(large scale parameters) 실측값을 기반으로 scatterer들을 통계적으로 분포, 사용자가 설정한 개수의 multipath들을 구현할 수 있다.

$S$ 개의 송신신호 path 중  $s$ 번째 path에 대한 initial delay  $\tau_s$ 는 식 (9)와 같다.  $r_r$ 는 실측값에서 얻어지는 proportionality factor,  $\sigma_r$ 는 initial RMS delay spread,  $X_s$ 는  $X_s \sim U(0,1)$ 인 균일분포를 따른다<sup>[7]</sup>.

$$\tau_s = -r_r \sigma_r \ln(X_s) \quad (9)$$

NLOS(non-line-of-sight) path, 즉 indirect path(multi path)의 power는 single slope exponential power-delay profile (PDP)로 식 (10)과 같으며,  $Z_s$ 는  $Z_s \sim N(0, \zeta^2)$ 인 정규분포를 따른다<sup>[7]</sup>.

$$P_s^{[1]} = \exp\left(-\tau_s \frac{r_r - 1}{r_r \sigma_r}\right) \cdot 10^{-\frac{Z_s}{10}} \quad (10)$$

Direct path인 첫 번째 path power  $P_1^{[2]}$ 와 indirect path (multipath) power  $P_{2,...,S}^{[2]}$ 은 식 (11)과 같다.  $K$ 는 Rician K-factor이며, direct path power를 indirect paths power의 합으로 나눈 값으로 정의된다<sup>[7]</sup>.

$$P_1^{[2]} = K \cdot \sum_{s=2}^S P_s^{[1]}, \quad P_{2,...,S}^{[2]} = P_{2,...,S}^{[1]} \quad (11)$$

그다음, path power  $P_s$ 은 그 합이 1이 되도록 식 (12)와 같이 정규화된다<sup>[7]</sup>.

$$P_s = P_s^{[2]} / \sum_{s=1}^S P_s^{[2]}, \quad s = 1, ..., S \quad (12)$$

Multipath 신호의 AoA(azimuth angle of arrival), AoD(azimuth angle of departure), EoA(elevation angle of arrival), EoD(elevation angle of departure)은 정규분포에 의해 결정된다<sup>[7]</sup>.

그림 1은 QuaDRiGa에서 송신기(Tx) 및 수신기(Rx), FBS(first bounce scatterer) 및 LBS(last bounce scatterer), 그리고 direct path 및 multipath의 시뮬레이션 결과이다. QuaDRiGa는 송신신호의 path들 중 multipath가 FBS(first bounce scatterer) 및 LBS(last bounce scatterer)를 경유하여 수신기(Rx)로 도달하도록 신호를 모델링한다.

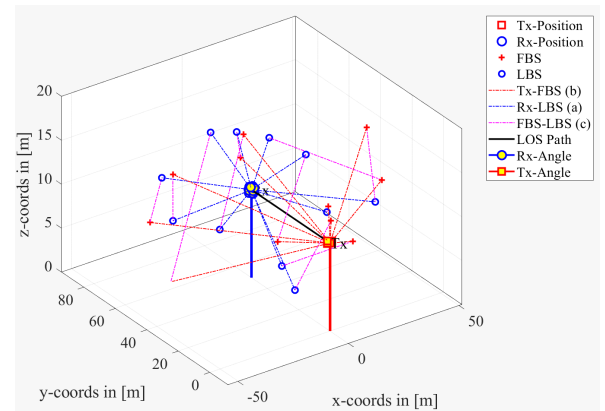


그림 1. QuaDRiGa에서 구현된 Tx 및 Rx, FBS 및 LBS, 그리고 direct path 및 multipath

Fig. 1. In QuaDRiGa, the implemented Tx and Rx, FBS and LBS, and the direct path and multipath.

#### IV. QuaDRiGa를 적용한 FMCW 레이다 시뮬레이션

본 연구에서 QuaDRiGa를 레이다 신호에 적용 시, 레이다에서 타겟까지의 송신신호는 direct path만을 고려하였고, 송신신호가 타겟에서 반사된 후 형성된 direct path 및 multipath가 다시 레이다로 돌아오는 상황을 가정하여 모델링하였다. QuaDRiGa를 적용한 레이다 시뮬레이션 시 송신신호는 식 (13), direct path 및 indirect path(multi path) 수신신호  $x_{RX,s}(t)$ 는 식 (14)와 같이 모델링 하였다.

$$x_{TX}(t) = \sqrt{P_t} \exp(j2\pi[f_c t + \frac{1}{2}\beta t^2]) \quad (13)$$

$$x_{RX,s}(t) = B \times \sqrt{\frac{P_s}{P_t}} \exp(j2\pi[(f_c(t - \tau_{s,radar}(t)) + \frac{1}{2}\beta(t - \tau_{s,radar}(t))^2)], s = 1, \dots, S, \\ B = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}} \quad (14)$$

레이다 신호가 타겟에 반사될 때, direct 및 indirect path(multipath) 신호들의 크기는 direct path 수신신호의 크

기  $B$ 에  $\sqrt{P_s/P_t}$ 를 곱하여, QuaDRiGa에서 생성한 direct path 및 multipath 신호 크기 간의 비율을 반영하였다.  $\tau_{1,radar}(t)$ 은 식 (2)의  $\tau(t)$ 와 같이 direct path의 레이다 및 타겟 간 거리의 왕복 소요 시간이고,  $\tau_{s,radar}(t)$  ( $s=2, \dots, S$ )는 신호가 레이다에서 타겟으로 direct path로 진행 시 소요 시간과 타겟에서 레이다로 multipath으로 진행 시 소요 시간을 더한 값이다.

$x_{RX,s}(t)$ 에서  $s=2, \dots, S$ 에 해당하는 multipath는 QuaDRiGa에서 생성한 multipath 중 레이다 정면 기준으로 좌측  $90^\circ$ 에서 우측  $90^\circ$  사이의 azimuth angle, 상방  $90^\circ$ 에서 하방  $90^\circ$  사이의 elevation angle 범위로 수신되는 multipath만 고려하였다. 레이다 수신 안테나의 형태 및 이득 패턴에 따라 수신 가능한 신호의 방향 범위에 차이가 있겠으나, 본 논문에서는 레이다 후방에서 접근하는 신호는 수신하지 않는 상황으로 가정하였다.

$x_{TX}(t)$ 와  $\sum_{s=1}^S x_{RX,s}(t)$ 를 dechirp, decimation, 그리고 1D 및 2D FFT를 수행하며 beat 및 Doppler frequency, range-Doppler map을 그림 2와 같이 Simulink로 구현하였다.

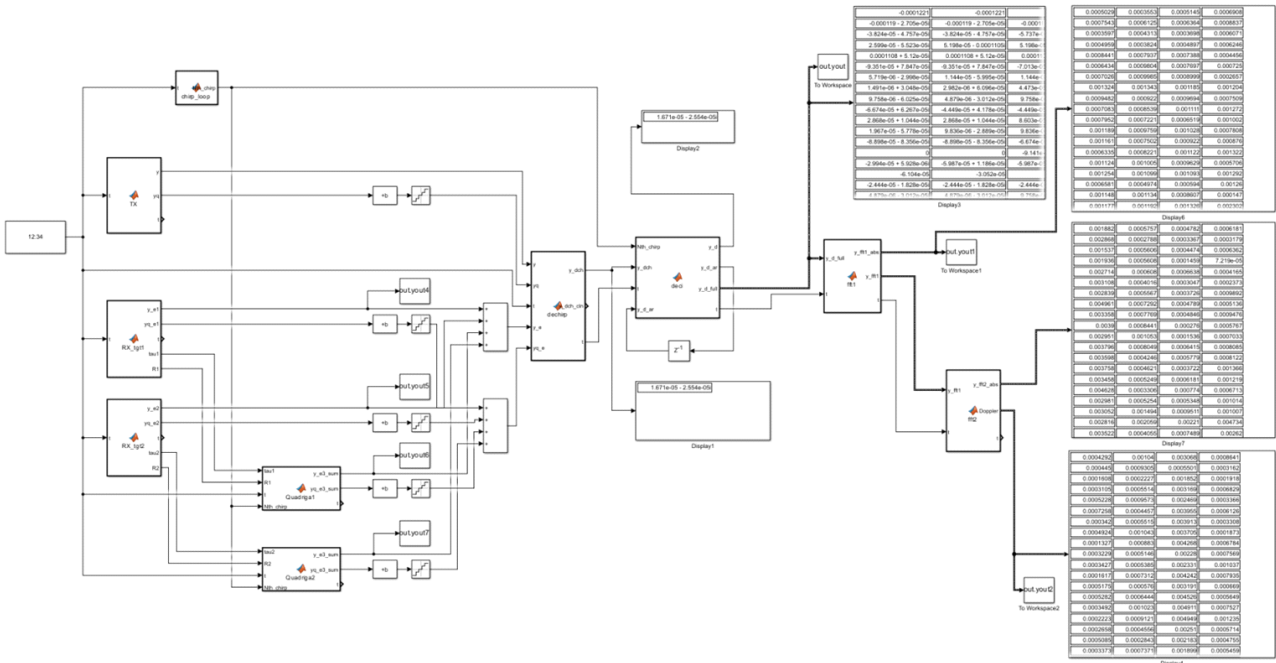


그림 2. QuaDRiGa를 적용한 FMCW 레이다 시뮬레이터의 Simulink 블록 다이어그램  
Fig. 2. Simulink block diagram of FMCW radar simulator applying QuaDRiGa.

## V. 시뮬레이션을 통한 클러스터 구현

본 장에서는 QuaDRiGa를 적용한 FMCW 레이더 시뮬레이터(그림 2)로 QuaDRiGa를 적용하지 않은 free space 상황과 QuaDRiGa를 적용한 도심 환경에서 발생하는 multipath가 존재하는 상황에 대하여 시뮬레이션 하였다.

해당 레이더 시뮬레이터는 거리/속도/RCS 정보를 가진 최대 2개 타겟에 대하여 레이더 시뮬레이션을 수행할 수 있으며, 사용자가 설정한 비트 수에 따라 송/수신신호를 양자화시키는 기능이 있다. 본 장의 시뮬레이션에서는 1개 타겟에 대해 시뮬레이션 하였고, 송/수신신호에 대한 양자화는 적용하지 않았다. 본 장에서 수행한 시뮬레이션의 FMCW 파형 및 신호처리 파라미터는 표 1과 같고, 타겟의 거리, 속도, RCS와 레이더 및 타겟의 높이는 표 2와

표 1. FMCW 파형 및 신호처리 파라미터

Table 1. FMCW waveform parameters.

Starting frequency	24 GHz
Bandwidth	100 MHz
Sampling frequency	150 MHz
Chirp time	25 $\mu$ s
The number of chirps	16
Peak transmitted power ( $P_t$ )	1 Watt
Transmit antenna gain ( $G_t$ )	1
Receive antenna gain ( $G_r$ )	1
Quantization of transmitted and received signals	Not applied
Decimation factor of dechirp signal	20
1D-FFT length	256
2D-FFT length	16

표 2. 타겟 파라미터

Table 2. Target parameters.

Range	Radar forward 50 m
Velocity	Radar forward 30 m/s (receding direction)
RCS	10 m <sup>2</sup>

\* Height of radar and target: 10 m

같다.

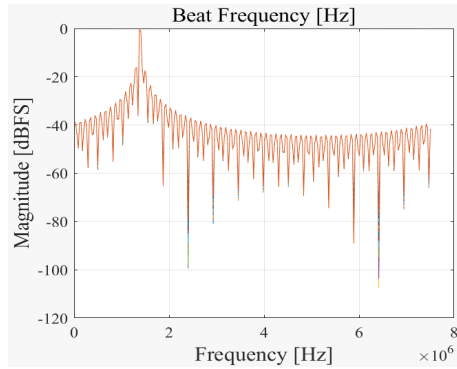
본 장의 시뮬레이션에서 사용한 QuaDRiGa 프로그램은 2.8.1. 버전이며<sup>[5]</sup>, 3GPP TR 38.901 standard의 urban(도심) micro-cell 지역에 대한 LSP를 적용하도록 설정하였다<sup>[8]</sup>. 24 GHz의 carrier frequency를 적용한 주요 LSP 값은 표 3과 같다.

QuaDRiGa를 적용하지 않은 free space 상황과 QuaDRiGa를 적용한 도심 환경에서 발생하는 multipath가 존재하는 상황에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 3 및 그림 4와 같다. 그림 3(a) 및 그림 4(a)의 beat frequency는 각 chirp에 대한 beat 신호의 1D-FFT 결과를 plot한 것이며, 2D-FFT 길이에 해당되는 16개의 plot line이 형성되어 있다. 그림 3(b) 및 그림 4(b)의 Doppler frequency는 2D-FFT 결과를 각 time sample 별로 plot한 것이며, 1D-FFT 길이에 해당되는 256개의 plot line이 형성되어 있다.

표 3. LSP(large scale parameter) 값<sup>[8]</sup>(3GPP TR 38.901 urban micro-cell)

Table 3. LSP (large scale parameter) values<sup>[8]</sup> (3GPP TR 38.901 urban micro-cell).

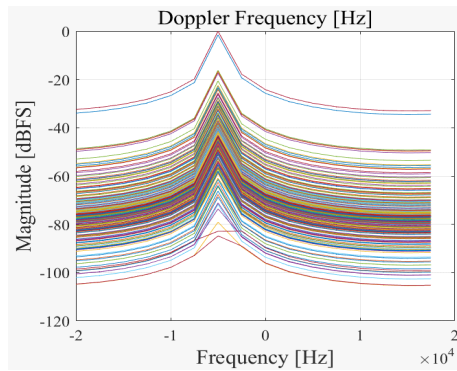
Delay spread [dB]	Mean	-7.14
	Standard deviation	0.38
AOD spread [dB] (AOD: Azimuth angle of departure)	Mean	1.21
	Standard deviation	0.41
AOA spread [dB] (AOA: Azimuth angle of arrival)	Mean	1.73
	Standard deviation	0.28
EOD spread [dB] (EOD: Elevation angle of departure)	Mean	0.83
	Standard deviation	0.35
EOA spread [dB] (EOA: Elevation angle of arrival)	Mean	0.73
	Standard deviation	0.34
Ricean K-factor [dB]	Mean	9
	Standard deviation	5
XPR (Cross polarization ratio) [dB]	Mean	9
	Standard deviation	3
Shadow fading [dB]	Standard deviation	4
Proportionality factor	3	
The number of clusters	12 (the number of multipaths: 11)	



(a) 비트 주파수

(a) Beat frequency

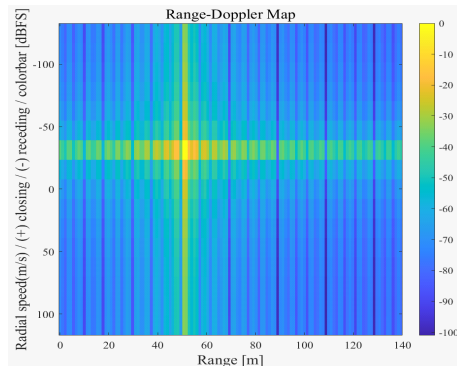
\* The number of plot line: 16(2D-FFT length)



(b) 도플러 주파수

(b) Doppler frequency

\* The number of plot line: 256(1D-FFT length)

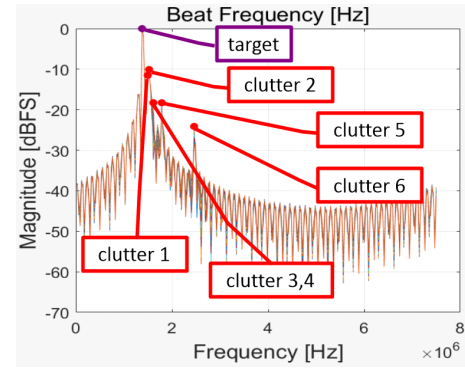


(c) 거리-도플러 맵

(c) Range-Doppler map

그림 3. QuadRiGa를 적용하지 않은 free space 상황에 대한 레이더 시뮬레이션 결과

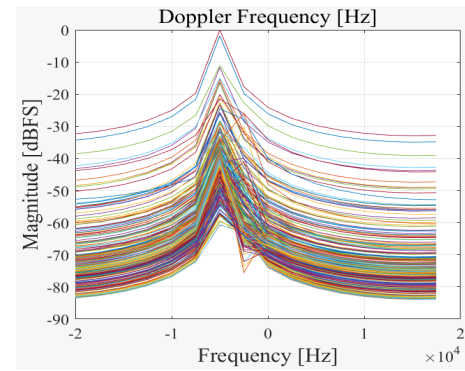
Fig. 3. Results of radar simulation for a free space situation without applying QuadRiGa.



(a) 비트 주파수

(a) Beat frequency

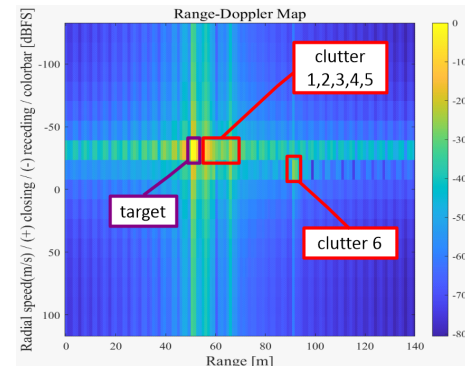
\* The number of plot line: 16(2D-FFT length)



(b) 도플러 주파수

(b) Doppler frequency

\* The number of plot line: 256(1D-FFT length)



(c) 거리-도플러 맵

(c) Range-Doppler map

그림 4. QuadRiGa를 적용한 도심 환경에 대한 레이더 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Results of radar simulation for an urban environment with QuadRiGa applied.

QuaDRiGa를 적용하지 않은 free space 상황일 경우(그림 3), beat frequency(그림 3(a)) 및 Doppler frequency(그림 3(b))에 타겟의 peak가 1개 형성되어 있고, range-Doppler map(그림 3(c))에도 타겟이 1개 구현됨을 확인할 수 있다.

반면, QuaDRiGa를 적용한 경우(그림 4), beat frequency(그림 4(a)) 및 Doppler frequency(그림 4(b))에 real 타겟의 peak뿐만 아니라 multipath에 의한 클러스터의 peak들이 형성되어 있고, range-Doppler map(그림 4(c))에도 real 타겟 및 클러스터가 함께 구현됨을 확인할 수 있다.

클러스터가 타겟 탐지에 미치는 영향을 정량적으로 확인하기 위해, 총 타겟 신호 크기와 총 클러스터 신호 크기의 비인 SCR(signal-to-clutter ratio)<sup>[9]</sup>을 식 (15)를 이용하여 산출하였다.

$$SCR = 10\log_{10} \left( \frac{\sum_{i=1}^I |X_{BF,1D,i}[k_i]|^2}{\sum_{j=1}^J |X_{BF,1D,j}[k_j]|^2} \right) \quad (15)$$

$|X_{BF,1D,i}[k]|$ 는 타겟  $i$ 에 대한 beat frequency 스펙트럼,  $I$ 는 타겟의 개수,  $k_i$ 는  $|X_{BF,1D,i}[k]|$ 가 peak 값일 때의 index다.  $|X_{BF,1D,j}[k]|$ 는 클러스터  $j$ 에 대한 beat frequency 스펙트럼,  $J$ 는 클러스터의 개수,  $k_j$ 는  $|X_{BF,1D,j}[k]|$ 가 peak 값일 때의 index다. 식 (15)를 통해, 그림 4의 beat frequency에서의 SCR은 9.97 dB로 산출되었다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 통계적 채널 모델 중 하나인 QuaDRiGa (quasi-deterministic radio channel generator)를 FMCW 레이더 시뮬레이터에 적용 및 시뮬레이션하여, real 타겟 뿐만 아니라 multipath에 의해 생성된 클러스터가 함께 구현됨을 확인하고, SCR 산출을 통해 클러스터가 타겟 탐지에 미치는 영향을 확인하였다.

이상적인 free space 상황에서 레이더는 real target을 탐지할 수 있으나, 현실의 도심과 같은 복잡한 환경에서 레이더는 real target뿐만 아니라 클러스터도 탐지하게 되며, 사용자 입장에서 real target과 클러스터를 구분하기 위해서는 별도의 알고리즘 또는 기법을 적용해야 할 것이다. 따라서, 향후 연구로 multipath로 인해 형성된 클러스터를 식

별 및 제거할 수 있는 기법을 연구 및 적용함으로써, 복잡한 환경에서의 레이더의 효용성을 제고할 수 있을 것으로 기대한다.

## References

- [1] Z. Yun, M. F. Iskander, "Ray tracing for radio propagation modeling: Principles and applications," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1089-1100, Jul. 2015.
- [2] D. He, B. Ai, K. Guan, L. Wang, Z. Zhong, and T. Kürner, "The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications: A tutorial," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 10-27, 2019.
- [3] J. Karedal, F. Tufvesson, N. Czink, A. Paier, C. Dumard, and T. Zemen, et al., "A geometry-based stochastic MIMO model for vehicle-to-vehicle communications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 7, pp. 3646-3657, Jul. 2009.
- [4] S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Börner, L. Thiele, F. Burkhardt, and E. Eberlein, "QuaDRiGa: Quasi deterministic radio channel generator, user manual and documentation," *Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, Tech. Rep.*, Dec. 2023. Available: <https://quadriga-channel-model.de/download/534243>
- [5] Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, "QuaDRiGa: Quadriga-channel-model.de," Available: <https://quadriga-channel-model.de>
- [6] R. Wan, Y. Song, T. Mu, and Z. Wang, "Moving target detection using the 2D-FFT algorithm for automotive FMCW radars," in *Proceedings of 2019 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering(CISCE)*, Haikou, Jul. 2019, pp. 239-243.
- [7] S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Börner, and L. Thiele, "QuaDRiGa: A 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 6, pp. 3242-3256, Mar. 2014.



[8] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), "Table 7.5-6 Part-1: Channel model parameters for UMi-street Canyon and UMa," Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz(3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16), ETSI-TR-138-901, Sophia Antipolis, France, Nov. 2020.

[9] S. P. Sira, D. Cochran, A. Papandreou-Suppappola, D. Morrell, W. Moran, and S. D. Howard, et al., "Adaptive waveform design for improved detection of low-RCS targets in heavy sea clutter," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 1, no. 1, pp. 56-66, Jun. 2007.

현 준 보 [서울대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0004-7321-6336>



2023년 3월~현재: 서울대학교 전기·정보공학부 석사과정  
[주 관심분야] 레이더 시스템, 전파 채널, 신호처리

김 해 림 [LIG Nex1/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0009-8391-2489>



2023년: 홍익대학교 전자전기공학부 졸업  
2023년~현재: LIG넥스원 선임연구원  
[주 관심분야] DSP, RFSoc, FPGA, 방위산업

조 영 기 [LIG Nex1/연구위원]

<https://orcid.org/0009-0009-3608-2531>



2000년: 인하대학교 자동화공학과 졸업  
2002년: 인하대학교 자동화공학과 석사  
2002년~현재: LIG넥스원 연구위원  
[주 관심분야] 임베디드 시스템, 방위산업

남 상 욱 [서울대학교/명예교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3598-1497>



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과(공학사)  
1983년 2월: 한국과학기술원 전자공학과(공학석사)  
1989년: Electrical Engineering at the University of Texas at Austin(공학박사)  
1990년 3월~2024년 2월: 서울대학교 전기·정보공학부 교수

2024년 2월~현재: 서울대학교 전기·정보공학부 명예교수  
[주 관심분야] Antenna and Wave Propagation, EM Field Numerical Analysis, Microwave & Millimeter-Wave Active/Passive Circuit Design 등

최 원 석 [LIG Nex1/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0000-2663-4421>



2006년: 홍익대학교 전기전자공학부 졸업  
2017년: 연세대학교 국방공학과 석사  
2007년~현재: LIG넥스원 수석연구원  
[주 관심분야] FPGA, 필터, 센서, 방위산업