

# 5G NR 通信雷达一体化系统雷达性能分析



叶启彬<sup>1</sup>, 胡泽林<sup>1</sup>, 黄驿轩<sup>1</sup>, 胡 苏<sup>1\*</sup>, 崔国龙<sup>2</sup>, 张振宇<sup>3</sup>

(1. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 611731;

2. 电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731; 3. 北京小米移动软件有限公司 北京 海淀区 100044)

**【摘要】**随着无线通信 5G/6G 技术的发展, 基于通信雷达一体化 (RadCom) 技术的新兴业务不断涌现。为实现基于 5G 新空口 (NR) 的 RadCom, 需考虑 3GPP 定义的最新 5G NR 无线通信标准所涵盖的多种部署场景, 然而, 在不同场景中雷达探测性能会受限于 5G NR 参数集。因此, 需在特定的场景下, 探索采用不同 5G NR 参数集的雷达探测性能。以车联网 (IoV) 场景的雷达探测需求和基础雷达性能参数计算准则为约束, 给出了不同 5G NR 参数集条件下的雷达探测性能仿真分析, 为未来基于 5G NR 标准及其部署场景的 RadCom 系统设计及优化给出指导性建议。

**关键词** 5G NR; 车联网; 正交频分复用; 通信雷达一体化

中图分类号 TN929

文献标志码 A

doi:10.12178/1001-0548.2022299

## Radar Performance Analysis of 5G NR RadCom System

YE Qibin<sup>1</sup>, HU Zelin<sup>1</sup>, HUANG Yixuan<sup>1</sup>, HU Su<sup>1\*</sup>, CUI Guolong<sup>2</sup>, and ZHANG Zhenyu<sup>3</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Communication, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

3. Beijing Xiaomi Mobile Software Co., Ltd. Haidian Beijing 100044)

**Abstract** With the development of wireless communication 5G/6G technology, a variety of new services based on the fusion of communications and radar (RadCom) technology continue to emerge. In order to implement RadCom based on 5G new radio (NR), many different deployment scenarios covered by the latest 5G NR wireless communication standard defined by 3GPP need to be considered. However, radar detection performance is limited by 5G NR numerology in different scenarios. Therefore, it is necessary to explore the radar detection performance with different 5G NR numerology in specific scenes. This paper takes the radar detection requirements of internet of vehicle (IoV) scenes and the calculation criteria of basic radar performance parameters as constraints, and presents the simulation analysis of radar detection performance under different 5G NR numerology. Some instructive suggestions are given for the designs and optimizations of RadCom systems based on 5G NR standard and deployment scenarios in the future.

**Key words** 5G NR; IoV; OFDM; RadCom

近年来, 随着电子信息技术的迅猛发展, 信息技术、移动通信技术、人工智能与大数据技术实现了深度融合<sup>[1-2]</sup>, 驱动着 5G 在技术和业务两个层面向 6G 演进<sup>[3-4]</sup>。在下一代无线通信 5G/6G 技术的研发过程中, 移动互联网和物联网业务需求不断提高, AI 业务、沉浸式业务和数字孪生业务不断涌现<sup>[5-6]</sup>。海量新兴业务对未来的无线网络提出了更高的信息处理诉求, 使得能部署于多种场景的通

信雷达一体化 (fusion of communications and radar, RadCom) 技术成为重要的研究方向之一。

在基于软硬件资源共享的同时, RadCom 是实现无线通信与雷达探测功能协同的新型信息处理技术, 可以有效提升系统频谱利用率、硬件效率和信息处理速率<sup>[7-8]</sup>。为实现基于 5G 新空口 (new radio, NR) 无线通信标准的 RadCom, 最便捷的方式是利用现有的 5G NR 通信信号完成对目标的雷达探

收稿日期: 2022-08-30; 修回日期: 2022-10-20

基金项目: 国家自然科学基金 (61971092, 62222121); 中央高校基金 (ZYGX2020ZB045, ZYGX2019J123); 省级基金 (2020JDJQ0023)

作者简介: 叶启彬 (1996-), 男, 博士生, 主要从事宽带多载波通信雷达一体化波形设计方面的研究。

\*通信作者: 胡苏, E-mail: husu@uestc.edu.cn

测, 该方式复杂度低、易实现。现有的 5G NR 设备具有高效的通信性能, 且因系统使用了较大的信号带宽, RadCom 系统可实现对目标的高精度雷达探测。现有的 5G 设备部署密集、广泛, 为 RadCom 系统在大规模场景中的使用创造了机会, 且无需进行额外的设备部署, 可极大提高现有 5G NR 设备的利用率, 降低研发成本。

在 3GPP 定义的基于正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 的最新 5G NR 无线通信标准中, 支持多种灵活的 OFDM 参数集, 涵盖了海量新兴业务场景<sup>[9]</sup>。然而, 在不同业务场景中, 雷达探测性能受限于系统使用的 OFDM 参数集。现有基于 OFDM 波形的 RadCom 研究, 大多针对不同场景需求去设计相应特定的系统参数, 以达到相对最优的系统性能。最初, 文献 [1] 提出基于 OFDM 的 RadCom 系统, 在 24 GHz 的载频上, 实现了 RadCom 在车联网 (internet of vehicle, IoV) 场景中的初步应用。文献 [10] 提供了一种信道估计方案, 通过优化导频功率分配和布局设计, 提升 RadCom 系统在 IoV 场景中的性能。针对使用子载波数较少的场合, 文献 [11] 通过设计格雷互补序列编码实现对 RadCom 系统发送信号的峰均功率比 (peak-to average power ratio, PAPR) 抑制。此外, 在低 PAPR 的业务场景中, 文献 [12-13] 将恒包络 OFDM(constant envelope OFDM, CE-OFDM) 技术应用于 RadCom 系统, 实现了系统发送的 RadCom 信号 PAPR 等于 0 dB。在多站联合跟踪场景中, 文献 [14] 在低频段上, 通过优化 OFDM 雷达波形, 最小化系统传输功率。以上系统都是针对 RadCom 进行了特殊设计, 但这会对传统的通信架构进行不小的改动。为了以最低成本实现基于 5G NR 标准的 RadCom, 需评估 RadCom 系统性能, 即在特定场景下, 对基于不同 5G NR 参数集的雷达探测性能进行探索。

本文首先对在 5G NR 标准下 RadCom 系统的研究进展和 5G NR 帧结构及参数集进行简述, 接着梳理了基于 5G NR 的 RadCom 系统的经典雷达处理算法, 然后总结了基于 5G NR 的雷达关键性能参数计算准则。最后, 以 IoV 场景的雷达探测需求和雷达关键性能参数计算准则为约束, 在最新的 5G NR 无线通信标准定义的 FR1 和 FR2 频段上, 对不同 5G NR 参数集下雷达的最大作用距离、最大相对速度、距离分辨率、速度分辨率和雷达探测图像等关键雷达探测性能进行仿真分析。

## 1 5G NR 帧结构及参数集

### 1.1 帧结构介绍

5G NR 在物理层设计上的一个突出特点是子载波间隔 (sub-carrier spacing, SCS) 具有很大的灵活性, 可以显著提高系统性能, 同时方便差异化业务部署。

3GPP 标准定义了两大频率范围 (frequency range, FR), 分别是 FR1 和 FR2 频段, 如表 1 所示<sup>[5]</sup>。对于 FR1 频段, 5G NR 支持的 SCS 分别为 15 kHz、30 kHz、60 kHz; 对于 FR2 频段, 5G NR 支持的 SCS 分别为 60 kHz、120 kHz、240 kHz (240 kHz 仅适用于同步信道)。5G NR 子载波的灵活性还体现在同一个子载波上的同步信道和数据信道可以使用不同的 SCS, 同一个用户可以根据移动速度、业务和覆盖场景选择使用不同的 SCS。

表 1 频率范围的定义

FR 频段	对应的频率范围	MHz
FR1	410 ~ 7 125	
FR2	24 250 ~ 52 600	

5G NR 的基本无线帧和子帧的长度是固定的, 且与长期演进技术 (long term evolution, LTE) 相同, 可以较好实现 LTE 与 5G NR 共存。5G NR 的时隙长度是可变的, 可以实现逐时隙的符号级变化。由图 1 可知, 在不同 SCS 的配置下, 每个时隙的符号数是相同的, 均为 14 个 OFDM 符号 (对于扩展循环前缀, 为 12 个 OFDM 符号)。但是, 每个 5G NR 无线帧和每个子帧中的时隙数不同, 随着子载波间隔的增加, 每个无线帧中所包含的时隙数也成倍增加。值得注意的是, 短的时隙长度有利于低时延传输。

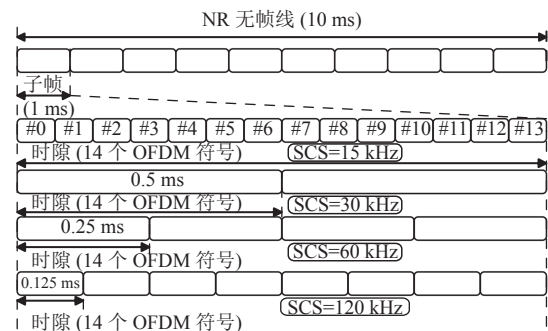


图 1 NR 的基本无线帧结构

### 1.2 参数集介绍

5G NR 系统支持的最大信道带宽与 SCS 有关。最小有效 SCS 分配必须保证某个子载波与信道的中心对齐, 因此对于确定的最大信道带宽,

最小有效 SCS 的信道中有 1/2 个 SCS 的偏移。同时对于确定的最大信道带宽, 不同的 SCS 必须保证他们各自的子载波 0 也是对齐的。最新的 5G NR 标准给出了 FR1 和 FR2 频段上的传输带宽与

$N_{RB}$ 配置<sup>[15]</sup>, 如表 2 和表 3 所示。其中,  $N_{RB}$ 表示资源块 (resource block, RB) 的数量。在 5G NR 标准中一个资源块由频域上的 12 个连续的子载波组成。

表 2 FR1 频的资源块 $N_{RB}$ 配置

个

SCS/kHz	最大传输带宽/MHz													
	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	
15	25	52	79	106	133	160	216	270	/	/	/	/	/	
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273	
60	/	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135	

表 3 FR2 频段的资源块 $N_{RB}$ 配置

个

SCS/kHz	最大传输带宽/MHz			
	50	100	200	400
60	66	132	264	/
120	32	66	132	264

基于 5G NR 标准的 RadCom 系统的信道带宽均以表 2 和表 3 进行配置。此外, 相关的符号周期和循环前缀如表 4 所示<sup>[9]</sup>。

表 4 5G NR 支持的子载波间隔表

SCS/kHz	基本符号周期 $T/\mu\text{s}$	循环前缀周期 $T_{cp}/\mu\text{s}$
15	66.70	4.70
30	33.30	2.30
60	16.70	1.20
120	8.33	0.59

## 2 基于 5G NR 的 RadCom 系统

在基于 5G NR 的 RadCom 系统中, 通信和雷达的紧密耦合可高效满足未来一些车联网业务的新需求。因为不需要部署专用雷达设备, 该方式具有硬件成本低、频谱利用率超高等特点, 可以为车辆提供全时全天候道路通行信息。

未来车联网场景可借助通信雷达一体化系统实现人、车、路的高效连接。因此, RadCom 将成为车联网的一个重要设计模式和研究方向。车辆借助一体化系统可实现车辆之间以及车辆与基础设施间的通信、对车速及位置的跟踪与控制、自动驾驶车辆的安全控制、停车监控、事故监控、雨雾天气道路环境的监控、道路车流量及状态估计等。图 2 给出了一个 RadCom 系统在交通场景中的示意图。

图 2 所示的交通场景中, 基站在广播通信雷达

一体化信号与周围车辆进行信息交互的同时, 通过接收反射回波信号来确定周围车辆的速度和位置信息, 从而及时为车辆提供交通安全信息。

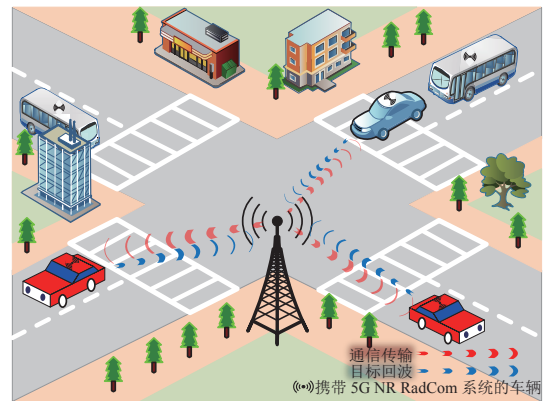


图 2 基于 5G NR 的 RadCom 系统的 IoV 场景

### 2.1 基于 5G NR 的通信处理流程

基于 5G NR 的 RadCom 系统的通信处理流程与传统 OFDM 信号处理流程相同。在发送端, 将比特数据通过串并转换 (serial/parallel, S/P) 映射到对应的子载波上, 调制成正交幅度调制 (quadrature amplitude modulation, QAM)/相移键控 (phase shift keying, PSK) 符号, 并将得到的频域调制符号通过逆离散傅里叶变换 (inverse discrete fourier transform, IDFT) 得到时域信号, 再通过并串转换 (parallel/serial, P/S) 得到 OFDM 时域信号矩阵。然后, 对其添加循环前缀 (cyclic prefix, CP) 用以避免符号间干扰 (inter symbol interference, ISI)。最后, 将 OFDM 符号通过射频前端发射至信道。在接收端, 对接收信号的通信解调则是通过与发射端相对应的逆处理流程。首先, 去除 CP, 再通过 S/P 和离散傅里叶变换 (discrete fourier transform, DFT) 得到频域调制符号。最后, 进行 QAM/PSK 解调, 再通过 P/S 得到比特数据。在基于 OFDM 的 RadCom 系统中引

入经典雷达处理模块, 该模块实现了利用一体化波形对目标速度和距离信息的提取。

## 2.2 基于 5G NR 的雷达处理流程

基于 5G NR 的 RadCom 系统的雷达处理流程如图 3 所示。

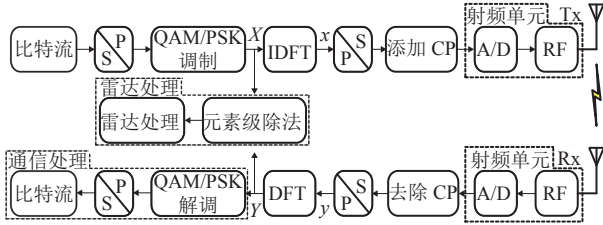


图 3 基于 OFDM 的通信雷达一体化系统信号处理流程

在发射端, 一个 OFDM 符号帧内的一体化时域发射信号可以表示为:

$$x(t) = \sum_{\mu=0}^{N_f-1} \sum_{n=0}^{N-1} d_{Tx}(\mu, n) e^{j2\pi f_n t} \text{rect}\left(\frac{t - \mu T_{\text{sym}}}{T_{\text{sym}}}\right) \quad (1)$$

式中,  $N_f$  表示累积的符号数;  $N$  表示子载波数;  $d_{Tx}(\mu, n)$  表示第  $\mu$  个 OFDM 符号上第  $n$  个子载波携带的调制符号;  $\text{rect}(\cdot)$  表示矩形窗函数;  $T_{\text{sym}} = T + T_{\text{cp}}$  表示一个完整 OFDM 符号周期,  $T$  表示一个基本 OFDM 符号周期,  $T_{\text{cp}}$  表示一个 OFDM 符号的循环前缀周期。

为保证每个子载波间的正交性, 避免载波间干扰 (inter carrier interference, ICI), 第  $n$  个子载波的基带中心频率需要满足以下条件:

$$f_n = n\Delta f = n/T \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

式中,  $\Delta f$  为子载波间隔, 且  $\Delta f = 1/T$ 。当环境中存在有动目标时, 接收信号会产生多普勒频移, 多普勒频移包含反射物的径向速度信息。对于雷达系统来说, 由于波形从发射到被雷达接收机接收, 经历两次往返传播, 故雷达系统的多普勒频移是通信的两倍, 其多普勒频移表达式如下:

$$f_d = 2v_{\text{rel}}/\lambda = 2v_{\text{rel}}f_c/c \quad (3)$$

式中,  $c$  表示光速;  $f_c$  表示载波频率;  $v_{\text{rel}}$  为雷达与目标间的相对速度; 波长  $\lambda = c/f_c$ 。

当仅考虑环境存在单目标, 其距离为  $R$ , 且其由相对运动而引起的多普勒频移为  $f_d$  的条件下, RadCom 系统接收端的接收信号可表示为:

$$y(t) = \sum_{\mu=0}^{N_f-1} \sum_{n=0}^{N-1} A(\mu, n) d_{Tx}(\mu, n) \times e^{j2\pi n\Delta f(t-2R/c)} e^{j2\pi f_d t} \text{rect}\left(\frac{t - \mu T_{\text{sym}} - 2R/c}{T_{\text{sym}}}\right) \quad (4)$$

式中,  $A(\mu, n)$  表示复振幅因子。为方便后续运算, 可忽略  $A(\mu, n)$ 。为更清晰地展示 RadCom 系统与目标之间的距离以及目标的相对速度产生的多普勒的影响, 可将上式重新排列为:

$$y(t) = \sum_{\mu=0}^{N_f-1} e^{j2\pi f_d t} \times \sum_{n=0}^{N-1} d_{Tx}(\mu, n) e^{-j2\pi n\Delta f 2R/c} e^{j2\pi n\Delta f t} \times \text{rect}\left(\frac{t - \mu T_{\text{sym}} - 2R/c}{T_{\text{sym}}}\right) \quad (5)$$

为降低信号处理的复杂度, 接收机仅利用基本 OFDM 符号周期  $T < T_{\text{sym}}$  内观察的接收信号来恢复调制符号。因此, 可以忽略式 (5) 中的  $\text{rect}(\cdot)$  函数。对于单个调制符号, 可以看出, 固定的 OFDM 符号索引  $\mu$  在 OFDM 信号带宽远小于载波频率时, 多普勒频移对同一 OFDM 符号内的每个子载波引起相同的相移。对同一符号上的不同子载波数据, RadCom 系统与目标之间的距离会产生相同的时间延迟, 这将在相邻子载波间引入线性相移。另一方面, 对于固定的子载波索引  $n$ , 多普勒效应会在该子载波上的调制符号之间引入一个线性相移, 相邻符号的同一子载波上的相移改变量与多普勒频率在整个 OFDM 符号周期  $T_{\text{sym}}$  上的相移改变量  $2\pi f_d T_{\text{sym}}$  一致<sup>[1]</sup>。而且, RadCom 系统与目标之间的距离并没有对紧随其后符号的相同子载波数据的相移造成影响, 即在一帧符号时间内, 同一子载波上由距离引起的相移相同。

此外, 最重要的是反射目标引入的距离和多普勒频移的影响完全正交。目标距离只沿频轴引入线性相移, 而多普勒频移只沿着时轴引入线性相移。只要在足够短的观测时间内, 就能够保持正交性, 即在这段时间内反射物保持在一个距离分辨单元内。由式 (1) 和式 (5), 可将接收调制符号表示为:

$$d_{Rx}(\mu, n) = d_{Tx}(\mu, n) e^{-j2\pi n\Delta f 2R/c} e^{j2\pi \mu T_{\text{sym}} f_d} \quad (6)$$

将式 (6) 表示为矩阵形式:

$$(\mathbf{D}_{Rx})_{\mu, n} = (\mathbf{D}_{Tx})_{\mu, n} \cdot (\mathbf{s}_r \otimes \mathbf{s}_d)_{\mu, n} \quad (7)$$

式中,  $(\cdot)$  表示矩阵 Hadamard 积;  $\otimes$  表示矩阵

Kronecker 积;  $\mathbf{D}_{Tx}$  表示参考矩阵;  $\mathbf{D}_{Rx}$  表示接收频域矩阵; 其中:

$$(\mathbf{D}_{Tx})_{\mu,n} = d_{Tx}(\mu,n), (\mathbf{D}_{Rx})_{\mu,n} = d_{Rx}(\mu,n) \quad (8)$$

定义  $\mathbf{s}_r$  为距离向量:

$$\mathbf{s}_r = (1, e^{-j2\pi\Delta f 2R/c}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\Delta f 2R/c})^T \quad (9)$$

式中,  $(\cdot)^T$  表示转置运算。  $\mathbf{s}_r$  用于描述目标距离带来的线性相移。定义  $\mathbf{s}_d$  为多普勒向量:

$$\mathbf{s}_d = (1, e^{j2\pi f_d T_{\text{sym}}}, \dots, e^{j2\pi(N_f-1)f_d T_{\text{sym}}}) \quad (10)$$

用于描述目标多普勒频偏带来的线性相移。

为了对目标的距离和相对速度进行估计, 首先对发射和接收端的频域符号矩阵之间进行元素级除法, 用于消除调制符号对雷达处理的影响, 如下:

$$(\mathbf{D})_{\mu,n} = (\mathbf{D}_{Tx})_{\mu,n} / (\mathbf{D}_{Rx})_{\mu,n} = (\mathbf{s}_r \otimes \mathbf{s}_d)_{\mu,n} \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{D}$  为目标待提取矩阵。为从式 (11) 中分别确定目标的距离  $R$  和速度  $v_{\text{rel}}$ , 可基于 IDFT/DFT 处理实现目标距离和速度的估计。

### 2.2.1 速度处理

对于同一个 OFDM 子载波, 即同一频率点, 目标的相对速度信息  $v_{\text{rel}}$  被包含在时间轴上的调制符号间的线性相移中。最简单的提取方式是对矩阵  $\mathbf{D}$  的每一行进行 DFT 处理:

$$\mathbf{V} = \mathbf{D} \mathbf{A}_{N_f} \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{A}_n$  为  $n$  维 DFT 矩阵, 其形式表示为:

$$\mathbf{A}_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega & \dots & \omega^{(N-1)} \\ 1 & \omega^2 & \dots & \omega^{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{(N-1)} & \dots & \omega^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中,  $\omega = e^{-j2\pi/N}$ 。式 (12) 中对矩阵  $\mathbf{D}$  某一行进行的 DFT 处理可表示为:

$$v(l) = \sum_{\mu=0}^{N_f-1} s_d(\mu) e^{-j2\pi\mu l / N_f} = \sum_{\mu=0}^{N_f-1} e^{j2\pi\mu f_d T_{\text{sym}}} e^{-j2\pi\mu l / N_f} \quad l = 0, 1, \dots, N_f - 1 \quad (14)$$

当  $f_d T_{\text{sym}} - l / N_f = 0$  时, 即:

$$l = \left\lfloor \frac{2v_{\text{rel}} f_c T_{\text{sym}} N_f}{c} \right\rfloor \quad (15)$$

$v(l)$  会取得峰值。因此, 目标的速度估计可表示为:

$$v_{\text{rel}} = \frac{cl}{2f_c T_{\text{sym}} N_f} \quad l = 0, 1, \dots, N_f - 1 \quad (16)$$

### 2.2.2 距离处理

对于同一个 OFDM 符号, 即同一时间点, 目标的距离信息  $R$  被包含在频率轴上的调制符号间的线性相移中。最简单的提取方式是对矩阵  $\mathbf{D}$  的每一列进行 IDFT 处理:

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}_N^{-1} \mathbf{D} \quad (17)$$

式中, 对矩阵  $\mathbf{D}$  某一列进行的 IDFT 处理可表示为:

$$r(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_r(k) e^{j2\pi mk / N} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j2\pi\Delta f k 2R/c} e^{j2\pi mk / N} \quad m = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (18)$$

当  $\Delta f 2R/c - m/N = 0$  时, 即:

$$m = \left\lfloor \frac{2R\Delta f N}{c} \right\rfloor \quad (19)$$

$r(m)$  会取得峰值。因此, 目标的距离估计可表示为:

$$R = \frac{cm}{2\Delta f N} \quad m = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (20)$$

在基于经典连续波 OFDM 的雷达处理过程中, 对通信雷达一体化系统的回波信号的距离处理与多普勒处理是相互独立且相互正交的。所有的处理步骤都是线性运算, 这说明在理论上同样的方法可以探测出无限数量的不同距离与相关速度的反射目标。

## 3 雷达性能参数

基于 5G NR 的 RadCom 系统的雷达处理可以参考经典的连续波 OFDM 雷达处理过程, 总结基于频域的目标参数提取运算准则如下。

### 1) 最大作用距离

为保证回波信号在去除 CP 后不会引入 ISI, 则会有  $2R/c \leq T_{\text{cp}}$ , 雷达的最大作用距离为:

$$R_{\text{max}} = \frac{T_{\text{cp}} c}{2} \quad (21)$$

根据上式, 雷达的最大作用距离与循环前缀周期  $T_{\text{cp}}$  成正比。

### 2) 最大多普勒频移

在基于 OFDM 的 RadCom 系统中, 脉冲重复间隔 (pulse repetition interval, PRI) 相当于一个完整

OFDM 符号周期, 即  $\text{PRI} = T_{\text{sym}}$ , 而脉冲重复频率 (pulse repetition frequency, PRF) 可表示为  $\text{PRF} = 1/\text{PRI} = 1/T_{\text{sym}}$ 。因此, 雷达可处理的最大多普勒频移为:

$$f_{d,r,\max} = \frac{\text{PRF}}{2} = \frac{1}{2T_{\text{sym}}} \quad (22)$$

仅与完整 OFDM 符号周期  $T_{\text{sym}}$  相关。

### 3) 最大相对速度

对于脉冲雷达而言, 最大相对速度为:

$$v_{r,\max} = \frac{\lambda f_{d,r,\max}}{2} = \frac{c}{4f_c T_{\text{sym}}} \quad (23)$$

式中,  $v_{r,\max}$  与载波频率  $f_c$  和完整符号周期  $T_{\text{sym}}$  相关。对于连续波 OFDM 雷达而言, 为保证可靠的信息交换, 需要保持子载波正交性的基本成立<sup>[1]</sup>, 即通信最大多普勒频移  $f_{d,c,\max} < \Delta f/10$ 。由于 RadCom 波形双向传输, 则基于通信约束的最大多普勒频移约束应表示为  $f_{d,c,\max} < \Delta f/5$ 。因此, 对于保证通信约束的连续波 OFDM 雷达, 可探测的最大相对速度为:

$$v_{c,\max} = \frac{\lambda f_{d,c,\max}}{2} = \frac{\lambda \Delta f}{2 \cdot 5} = \frac{c \Delta f}{10 f_c} \quad (24)$$

式中,  $v_{c,\max}$  与子载波间隔  $\Delta f$  和载波频率  $f_c$  相关。故 RadCom 系统可探测的最大相对速度如下:

$$v_{\max} = \min\{v_{d,\max}, v_{c,\max}\} \quad (25)$$

### 4) 距离分辨率

若不保证回波信号在去除 CP 后不会引入 ISI, 则会有  $2R/c \leq T$ , 所以雷达的距离分辨率为:

$$\Delta R = \frac{Tc}{2N} = \frac{c}{2N\Delta f} = \frac{c}{2B} \quad (26)$$

由此, 可知距离分辨率  $\Delta R$  取决于系统传输带宽  $B$ 。

### 5) 多普勒分辨率

考虑式 (22) 给出的最大多普勒频移以及估计的总符号数  $N_f$ , 则雷达多普勒分辨率可表示为:

$$\Delta f_{d,r} = \frac{f_{d,r,\max}}{N_f/2} = \frac{\text{PRF}/2}{N_f/2} = \frac{1}{N_f T_{\text{sym}}} \quad (27)$$

式中, 多普勒分辨率  $\Delta f_{d,r}$  取决于系统的总符号累计时间  $N_f T_{\text{sym}}$ 。

### 6) 速度分辨率

雷达图像上两个点目标之间可区分的最小速度差, 可表示为:

$$\Delta v = \frac{\lambda \Delta f_{d,r}}{2} = \frac{c}{2f_c N_f T_{\text{sym}}} \quad (28)$$

式中, 速度分辨率  $\Delta v$  仅与载频  $f_c$  和符号累积时间  $N_f T_{\text{sym}}$  相关, 且直接受限于多普勒分辨率  $\Delta f_{d,r}$ 。

## 4 雷达探测性能分析

本文提出的雷达关键性能参数是针对基于 OFDM 架构的 5G NR 通信雷达一体化系统。

在 FR1 频段设定载波频率为  $f_c = 5 \text{ GHz}$ , 在 FR2 频段设定载波频率为  $f_c = 26 \text{ GHz}$ , 得到如下雷达探测性能参数图。

### 1) 最大作用距离仿真

分别在观测时间等于循环前缀周期  $T_{\text{cp}}$  和基本 OFDM 符号周期  $T$  下进行仿真。在对雷达最大作用距离的仿真中, 在 FR1 频段下, 从图 4 可以看出当  $T_{\text{cp}} = 2.3 \mu\text{s}$ , 即 SCS = 30 kHz 时, 雷达最大作用距离为  $R_{\max} = 344.8 \text{ m}$ , 可以满足绝大部分车联网场景中的距离探测需求, 对基于 5G NR 网络的车联网应用设计具有重要意义。

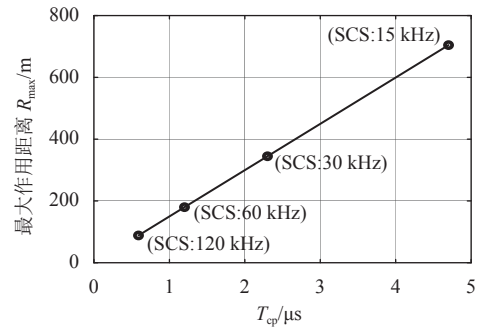


图 4 最大作用距离随循环前缀周期  $T_{\text{cp}}$  变化曲线图

### 2) 最大相对速度仿真

对于车联网场景, 车辆最大相对速度一般在 100 m/s 以下。由图 5 可知, 5G NR 标准参数集均能满足对目标车辆的最大相对速度探测需求。

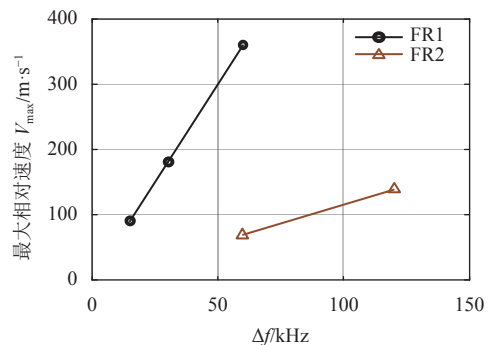
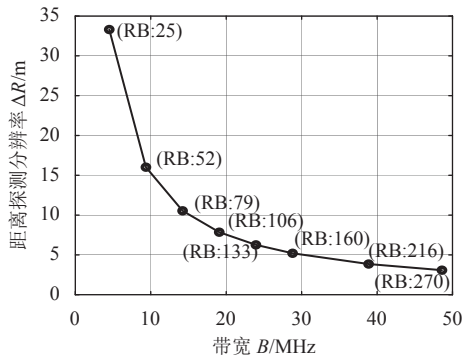


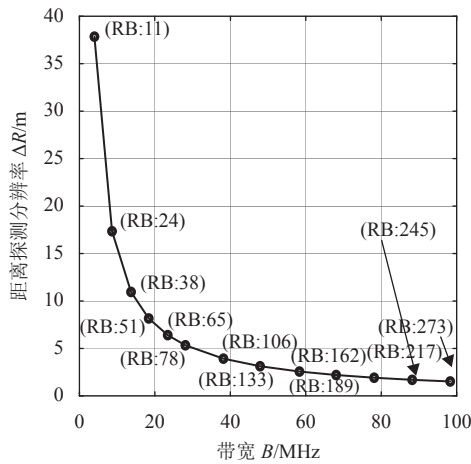
图 5 可探测最大相对速度随子载波间隔变化曲线图

3) 距离分辨率仿真

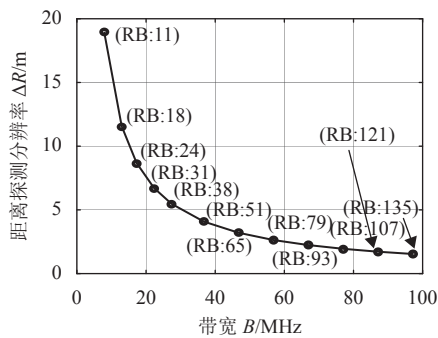
在 FR1 频段下, 基于表 2 的传输带宽配置, 给出距离探测分辨率随传输带宽变化曲线图。如图 6 所示, 图中标注了传输带宽所对应的 RB 数量。



a. FR1 频段下 SCS=15 kHz



b. FR1 频段下 SCS=30 kHz



c. FR1 频段下 SCS=60 kHz

图 6 距离分辨率随传输带宽变化曲线图-FR1 频段

在 FR2 频段下, 基于表 3 的传输带宽配置, 给出距离探测分辨率随传输带宽变化的曲线图, 如图 7 所示。结合表 2 和表 3, 通过分析图 6 和图 7 可知, 不同子载波间隔对应不同的最大传输带宽。在 FR1 频段 ( $f_c = 5 \text{ GHz}$ ) 和 FR2 频段 ( $f_c = 26 \text{ GHz}$ ), 给出不同 SCS 对应的最小距离分辨率, 如表 5 所示。

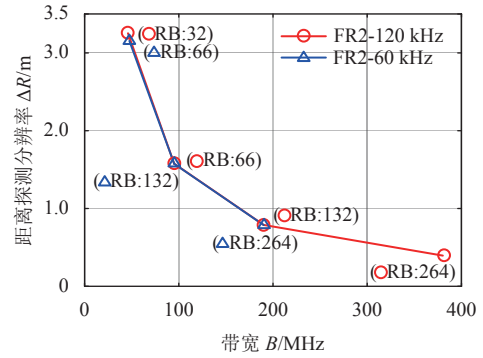


图 7 FR2 频段下距离分辨率随传输带宽变化曲线

表 5 不同 SCS 对应的最小距离分辨率表

SCS/kHz	最小距离分辨率 $\Delta R/\text{m}$	传输带宽 $B/\text{MHz}$
15	3.080	48.60
30	1.530	98.28
60	1.540	97.20
60	0.789	190.08
120	0.394	380.16

由表 5 可知, 使用传输带宽越大, 雷达距离分辨性能越好。在 FR1 频段, 由于最大传输带宽  $B = 100 \text{ MHz}$ , 距离分辨率极限约为  $\Delta R = 1.5 \text{ m}$ 。在 FR2 频段, 不考虑载波聚合时, 由于最大传输带宽最大可提高至  $380.16 \text{ MHz}$ , 能达到的距离分辨率极限约为  $\Delta R = 0.4 \text{ m}$ 。车联网场景应用可根据实际距离探测分辨率需求选择合适的传输带宽。

4) 速度分辨率仿真

在仿真过程中, 累积时间设定为 5G NR 的一个标准信号帧, 即  $N_f T_{\text{sym}} = 10 \text{ ms}$ 。在 FR1 和 FR2 频段下, 速度分辨率随累积时间的变化趋势如图 8 所示。

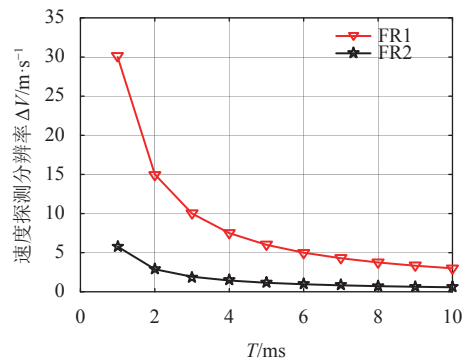


图 8 速度分辨率随累积时间变化曲线图

结合表 4 分析图 8 得知, 在符号累积时间为 1 帧的情况下, 在 FR1 频段 ( $f_c = 5 \text{ GHz}$ ), 雷达的最小速度分辨率为  $\Delta v = 3.000 \text{ m/s}$ ; 在 FR2 频段 ( $f_c = 26 \text{ GHz}$ ), 雷达的最小速度分辨率为  $\Delta v = 0.576 \text{ m/s}$ 。

5) 雷达处理图像仿真

基于 5G NR 不同的标准参数集, 分别在 FR1

和 FR2 频段下给出不同带宽下的雷达处理图像仿真, 如图 9 所示。

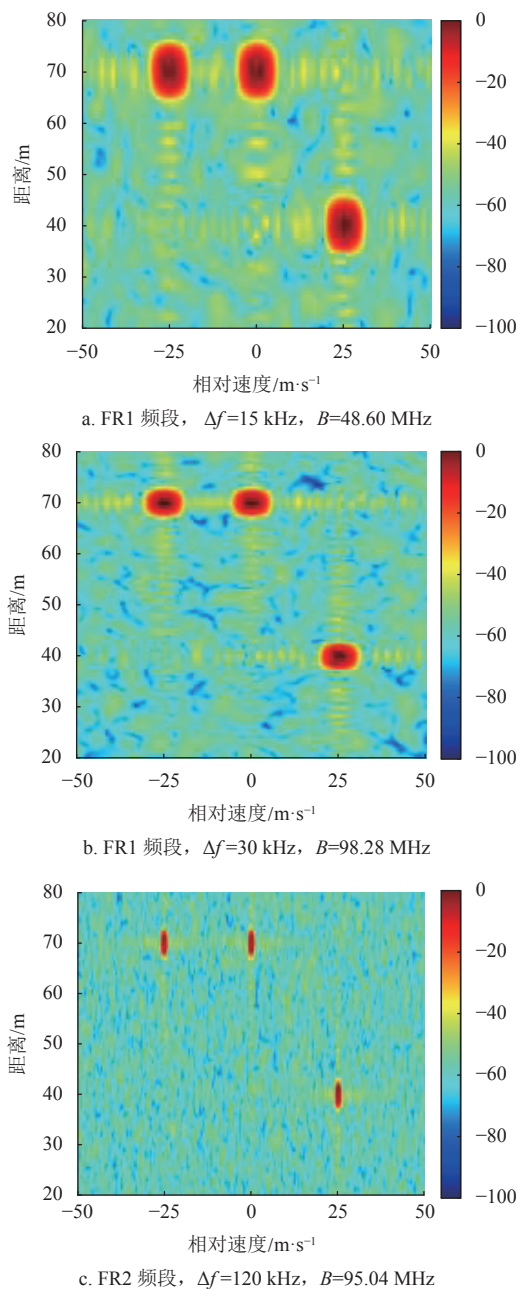


图 9 基于 5G NR 标准参数的雷达处理图像

分析图 9a 和图 9b 可知, 在 FR1 频段 ( $f_c = 5$  GHz), 符号累积时间为一帧后, 得到的雷达处理图像的距离分辨性能随传输带宽的增大而提高, 观测到的图像更清晰。分析图 9b 和图 9c 可知, 在 FR2 频段 ( $f_c = 26$  GHz), 符号累积时间为一帧后, 得到的雷达处理图像的距离分辨率和 FR1 频段的相同带宽下得到的雷达处理图像几乎相同。在速度分辨率方面, 由于载波频率的提高, 速度分辨性能有了较大提升。在车联网场景中, 通过选择合适的

传输带宽和子载波间隔, RadCom 系统可以实现对周围车辆车速及位置的获取, 反馈给交通网络, 从而增强交通安全。

## 5 结束语

本文面向未来 5G/6G 的研究热点通信雷达一体化技术, 以应用范围较广的 IoV 场景为例, 介绍了基于 5G NR 的 RadCom 系统, 并详述了基于 5G NR 的 RadCom 系统的通信传输和雷达处理技术。随后, 梳理了基于 OFDM 架构的 5G NR 通信雷达一体化系统的雷达关键性能参数运算准则。最后, 在不同 5G NR 标准参数集下, 给出基于 5G NR 的 RadCom 系统的雷达探测性能仿真结果, 针对车联网应用场景给出设计和优化的建议。本文所提供的基于 5G NR 的雷达探测性能仿真结果, 在 5G NR 所涵盖的多种不同应用场景中具有较大的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] STURM C, WIESBECK W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [2] LIU F, MASOUROS C, PETROPULU A P, et al. Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(6): 3834-3862.
- [3] DE-OLIVEIRA L G, NUSS B, ALABD M B, et al. Joint radar-communication systems: Modulation schemes and system design[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 70(3): 1521-1551.
- [4] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(3): 739-750.  
XIAO B, HUO K, LIU Y X. Development and prospect of radar and communication integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 739-750.
- [5] WYMEERSCH H, SHRESTHA D, DE-LIMA C M, et al. Integration of communication and sensing in 6G: A joint industrial and academic perspective[C]//2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Helsinki: IEEE, 2021: 1-7.
- [6] WILD T, BRAUN V, VISWANATHAN H. Joint design of communication and sensing for beyond 5G and 6G systems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 30845-30857.
- [7] 黄驿轩, 胡苏, 叶启彬, 等. 基于连续波的通信雷达一体化距离处理分析[J]. *电子科技大学学报*, 2022, 51(5): 688-693.  
HUANG Y X, HU S, YE Q B, et al. Range processing analysis for radcom based on continuous-wave[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2022, 51(5): 688-693.



- [8] HUANG Y X, HU S, MA S Y, et al. Designing low-PAPR waveform for OFDM-based RadCom systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(9): 6979-6993.
- [9] DAHLMAN E, PARKVALL S, SKOLD J. 5G NR: The next generation wireless access technology[M]. New York: Academic Press, 2018.
- [10] HSU H W, LEE M C, GU M X, et al. Analysis and design for pilot power allocation and placement in OFDM based integrated radar and communication in automobile systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(2): 1519-1535.
- [11] 李自琦, 梅进杰, 胡登鹏, 等. 基于分组格雷编码的 OFDM 雷达通信一体化系统峰均功率比抑制[J]. *雷达学报*, 2014, 3(5): 548-555.  
LI Z Q, MEI J J, HU D P, et al. Peak-to-Average power ratio reduction for integration of radar and communication systems based on OFDM signals with block golay coding[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 548-555.
- [12] DIDA M A, HAO H, WANG X, et al. Constant envelope chirped OFDM for power-efficient radar communication[C]//2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. Chongqing: IEEE, 2016: 298-301.
- [13] LI X, TANG L, ZHANG X. Range estimation of CE-OFDM for radar-communication integration[C]//2018 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). Chengdu: IEEE, 2018: 131-135.
- [14] SHI C, WANG F, SELLATHURAI M, et al. Power minimization-based robust OFDM radar waveform design for radar and communication systems in coexistence[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(5): 1316-1330.
- [15] 3GPP TS 38.104: Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 16)[EB/OL]. (2021-04-08). [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138100\\_138199/138104/15.13.00\\_60/](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/15.13.00_60/)

编辑 刘飞阳