

文章编号: 2095-4980(2023)11-1333-09

基于 5G 的外辐射源雷达模糊函数研究

高靖霞^a, 王海涛^{*a,b}, 欧阳缮^{a,b}, 廖可非^{a,b}

(桂林电子科技大学 a. 信息与通信学院; b. 卫星导航定位与位置服务国家地方联合工程研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 随着低空空域开放和无人机等航空技术的发展, 对城市或郊区等电磁频谱紧张的区域开展低空目标探测愈发重要, 采用 5G 信号作为机会照射源的外辐射源雷达在该领域展现出了广阔的应用前景。相比 4G 网络, 5G 波形方案的实现细节发生了本质的改变, 因此基于不同外辐射源信号的模糊函数也存在较大差异, 而现有文献对基于 5G 信号的外辐射源雷达模糊函数的相关研究仍然较为缺乏。本文从信号的基本结构入手, 采用对比分析的方法, 从理论上对 5G 信号和 4G 信号在帧结构及物理资源结构等方面存在的差异进行了详细对比; 搭建了系统仿真模型, 并对基于 5G 信号的外辐射源雷达的模糊函数进行了仿真实验; 最后, 针对模糊函数中的各类副峰, 分析了该模糊副峰产生的原因以及可能对信号探测性能造成的影响, 并对部分副峰的抑制方式进行简单阐述。该文为基于 5G 信号的外辐射源雷达副峰的抑制提供了新的思路和方向。

关键词: 外辐射源雷达; 5G 新空口; 模糊函数; 模糊副峰

中图分类号: TN958.97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021324

Research on radar ambiguity function of external emitter based on 5G

GAO Jingxia^a, WANG Haitao^{*a,b}, OUYANG Shan^{a,b}, LIAO Kefei^{a,b}

(a.School of Information and Communication; b.State and Local Joint Engineering Research Center for Satellite Navigation and Location Service, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: With the opening of low-altitude airspace and the development of aviation technologies such as drones, the detection of low-altitude targets in areas with tight electromagnetic spectrum such as cities or suburbs has become more and more important. 5G based passive bistatic radar has a wide application prospect in this field. Compared with 4G network, the implementation details of 5G waveform scheme have undergone essential changes. Therefore, the ambiguity functions based on the signals of different external radiators are also quite different. Nevertheless, there is still lack of research on the ambiguity function of 5G signal. Based on basic structure of signal, the differences between 5G signal and 4G signal in frame structure and physical resource structure are analyzed in detail in theory. System simulation model is built, and the radar ambiguity function based on 5G signal is simulated. Finally, the cause of the ambiguity and the possible influence on the signal detection performance are analyzed, and the suppression methods of some side peaks are briefly explained. This work provides a new idea and direction for the suppression of side peaks of external radiator radar based on 5G signal.

Keywords: passive bistatic radar; 5G New Radio (NR); ambiguity function; ambiguity sidelobes

外辐射源雷达是一种利用第三方辐射源信号(如 GSM、CDMA、GPS 及 ATV 等通信信号)进行探测的雷达^[1-2]。这种雷达自身不发射电磁波信号, 而是使用环境中已经存在的信号进行探测。较传统雷达而言, 它不仅降低了成本, 也节省了频谱资源, 被敌方检测到的概率更小, 具有极大的竞争优势。而它所独有的探测特性也使它具有不可替代的地位, 并逐渐成为各领域重要的感知手段之一^[2-5]。

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-11-12

基金项目: 广西创新驱动发展专项基金资助项目(桂科 AA21077008); 广西自然科学基金资助项目(2020GXNSFBA297078); 广西人才与基地专项资助项目(桂科 AD20297038); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(2021YCX039); 桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(2021YCX038)

*通信作者: 王海涛 email:wanghaitao@mails.guet.edu.cn

以移动通信信号为辐射源的无源雷达, 可通过组网的形式无缝覆盖全国空域, 在低空目标监视和补盲探测等领域具有十分广阔的应用前景, 引起了国内外学者的广泛关注^[5-11]。文献[8]搭建了实验系统, 验证了利用4G长期演进(Long Term Evolution, LTE)信号探测低空目标的可行性。文献[9]针对移动通信信号蜂窝布站结构中的同频干扰问题, 研究基于盲源估计的时域级联同频干扰抑制方法。文献[10]针对LTE信号的模糊函数副峰较高的问题, 从LTE信号结构入手, 讨论了基于该信号的被动雷达的模糊函数特性, 分析了帧间模糊带的产生原因并给出了相应的抑制方法。文献[11]从LTE的信号结构出发, 分析不同模糊副峰的产生机理, 对于给探测性能造成较大影响的模糊副峰, 提出了数据非连续分块和频带合成的方法来进行抑制。以上文献均是针对LTE信号进行的分析讨论, 而对于5G信号来说, 目前的研究相对较少。因此针对5G信号模糊函数特性的问题急需展开研究。

随着移动通信技术的发展, 5G网络将会成为未来移动通信系统的主流。与传统的4G LTE信号相比, 5G信号带宽更宽, 载频更高, 对低空目标的探测能力更强。与4G LTE信号固定的帧结构不同, 5G信号帧结构灵活多变, 其模糊函数也随帧结构呈现出不同的特性, 给被动雷达的探测带来了严峻的挑战。对此本文从5G信号的帧结构入手, 分析了5G信号相对于4G LTE信号的核心变化, 阐述了信号模糊函数与雷达探测性能之间的关系, 并将5G新空口(NR)信号与4G LTE信号的模糊副峰进行比较, 对不同模糊副峰的产生机理进行了详细的分析。

1 5G 信号分析

5G通信系统是在LTE系统的基础上进行改进的, 其物理下行信道的波形仍采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术调制。而5G NR相较于4G无线帧的核心变化是5G NR不仅在信号带宽上有了更多选择, 而且可以配置多种不同的子载波间隔, 其调制符号的长度也发生了相应的变化, 实现了空口资源的灵活分配, 并缩短了处理时长^[12-17]。例如5G NR将时隙作为调度单位, 每个常规循环前缀(Normal Cyclic Prefix, NCP)的时隙包含14个OFDM符号, 而当信号的子载波间隔为60 kHz时, 5G NR支持扩展循环前缀(Extended Cyclic Prefix, ECP), 即每个时隙只包含12个OFDM符号。在NR中, 3GPP主要指定了2个频率范围: 一个是Sub 6 GHz, 称为FR1; 另一个是毫米波, 称为FR2。为简化分析, 本文主要对FR1频段下的全下行NCP时隙信号展开研究。

1.1 下行物理层信号

5G NR的下行物理信道包括: 物理下行共享信道(Physical Downlink Shared Channel, PDSCH)、物理广播信道(Physical Broadcast Channel, PBCH)和物理下行控制信道(Physical Downlink Control Channel, PDCCH)。同时为了提高信道的传输利用率, 节约信道资源, 5G NR取消了小区参考信号(Cell Reference Signal, CRS), 用解调参考信号(Demodulation Reference Signal, DM-RS)和信道状态信息参考信号(Channel State Information-Reference Signal, CSI-RS)测量5G NR信道的状态, 并设置了相位跟踪参考信号(Phase-Tracking Reference Signal, PT-RS)、主同步信号(Primary Synchronization Signal, PSS)和辅同步信号(Secondary Synchronization Signal, SSS)^[18]。其中DM-RS和PT-RS伴随着物理下行信道传输, PT-RS是5G NR新引入的专门针对用户的特定参考信号, 主要用于抑制6 GHz频段以上严重的相位噪声和误差。本仿真中所使用的信号频段较低, 因此没有涉及PT-RS。物理下行信道的一般处理过程如图1所示。

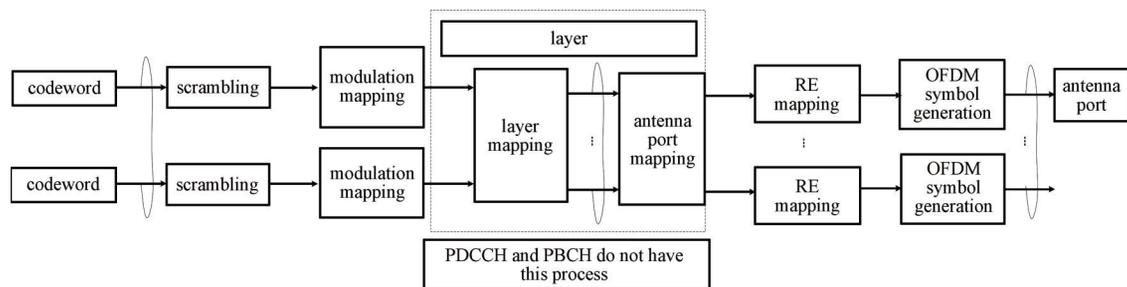


Fig.1 General processing procedure of the physical downlink channel

图1 物理下行信道的一般处理过程

1.2 信号帧结构

在通信系统中, 数据是以无线帧为单位进行传输的。5G NR无线帧和子帧的长度都是固定的, 每个无线帧信

号的长度为 10 ms，每帧信号中包含 10 个子帧，即每个子帧的长度为 1 ms。但每个子帧中时隙的个数和长度取决于子载波间隔(Subcarrier Spacing, SCS)，且随着子载波间隔的增加，每个无线帧/子帧中所包含的时隙数成倍地增加，时域上符号的长度相应缩短。为了支持多种多样的部署场景，5G NR 引入了更灵活的系统参数集合，支持子载波间隔为 $2^n \times 15$ kHz 的配置。例如在 6 GHz 以下的频段，支持 15 kHz、30 kHz、60 kHz 的子载波间隔^[19]。对于不同的子载波间隔，每个时隙中的符号数是相同的，即包含 14 个 OFDM 符号(ECP 信号包含 12 个 OFDM 符号)。图 2 给出了 5G NR 常规循环前缀在不同子载波间隔下的信号帧结构。

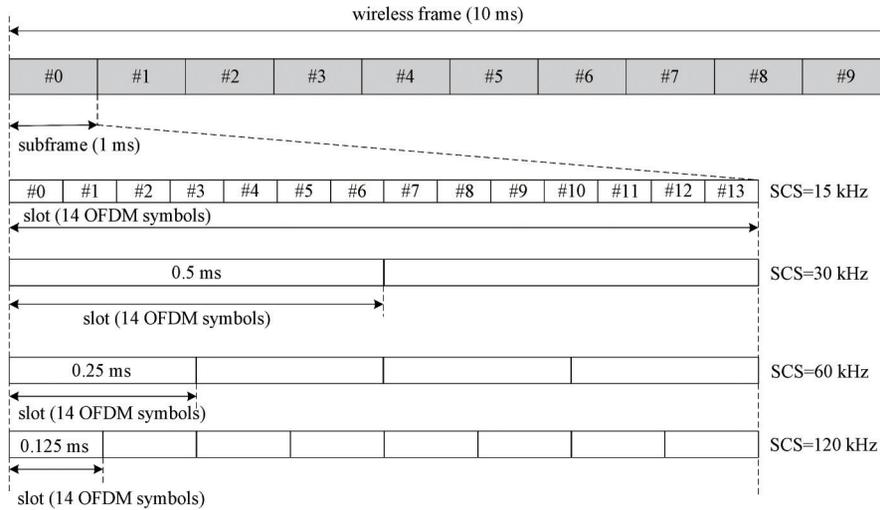


Fig.2 Frame structure of NR
图 2 NR 的无线帧结构

NR 在时域的基本时间单元为^[13]:

$$T_c = 1 / (\Delta f_{\max} \times N_f) = 1 / (480\,000 \times 4\,096) = 0.509 \text{ ns} \tag{1}$$

LTE 系统的基本时间单元为:

$$T_s = 1 / (\Delta f_{\text{ref}} \times N_{f,\text{ref}}) = 1 / (15\,000 \times 2\,048) = 32.552 \text{ ns} \tag{2}$$

T_s 与 T_c 之间满足固定的比值关系，即常量

$$k = \frac{T_s}{T_c} = 64 \tag{3}$$

这种设计有利于 NR 和 LTE 部署在同一个子载波上。NR 的 OFDM 符号(含 NCP)长度是 $(N_u^\mu + N_{\text{CP},1}^\mu) \times T_c$ ， N_u^μ 和 $N_{\text{CP},1}^\mu$ 的取值如式(4)和式(5)所示。

$$N_u^\mu = 2\,048 \text{ k} \times 2^{-\mu} \tag{4}$$

$$N_{\text{CP},1}^\mu = \begin{cases} 512 \text{ k} \times 2^{-\mu} & \text{ECP} \\ 144 \text{ k} \times 2^{-\mu} + 16k & \text{NCP, } l=0 \text{ 或 } l=7 \times 2^\mu \\ 144 \text{ k} \times 2^{-\mu} & \text{NCP, } l \neq 0 \text{ 或 } l \neq 7 \times 2^\mu \end{cases} \tag{5}$$

式中 μ 为子载波间隔配置的参数集，对于 PSS、SSS 和 PBCH(即同步信道)而言 $\mu \in \{0, 1, 3, 4\}$ ，对于数据信道而言 $\mu \in \{0, 1, 2, 3\}$ 。根据式(1)可以计算出 NCP 在不同子载波间隔配置下的符号长度和 NCP 长度，结果如表 1 所示。

表 1 在不同子载波间隔配置下的符号长度和 NCP 长度

Table1 Symbol length and NCP length under different subcarrier spacing configurations

μ	SCS/kHz	length of symbol/ μs	length of NCP($l=0$ or $l=7 \times 2^\mu$)/ μs	length of NCP(other symbols)/ μs	length of slot/ms
0	15	66.67	5.21	4.69	1.000 0
1	30	33.33	2.86	2.34	0.500 0
2	60	16.67	1.69	1.17	0.250 0
3	120	8.33	1.11	0.57	0.125 0
4	240	4.17	0.81	0.29	0.062 5

1.3 物理资源结构

5G NR 对每种参数集和载波, 都定义了一个资源网格^[20]。资源网格中的每个单元称为资源单元(Resource Element, RE), 由频域上的 1 个载波和时域上的 1 个符号长度共同构成。在信号传输过程中, 一些特殊信号(如参考信号、同步信号以及基站的小区广播信号等)被分配在资源网格中的特定位置进行传输, 剩余是资源单元块用于传输下行链路数据。其中 PSS、SSS 和 PBCH 必须同时发送, 简称 SS/PBCH 块。图 3 给出了 5G NR 信号中 SS/PBCH 块的仿真示意图, 横轴表示 OFDM 符号的个数, 纵轴为频率的大小。这里使用的 SCS 为 15 kHz, SSB 的第 1 个符号所处的位置为时隙中的第 3 个符号。对于 Case A 来说, 将 SSB 放在该处, 是考虑到其时隙开头的 2 个符号 0 和 1 可以用于下行控制的传输。从图中可以看出, 该仿真基本符合 SSB 的结构图。另外图 4 展示了仿真过程中, PDSCH、PDCCH 和控制资源集合(Control-Resource Set, CORESET)的资源结构占用情况。与上文提到的特殊信号在资源网格中的特定位置传输基本一致。

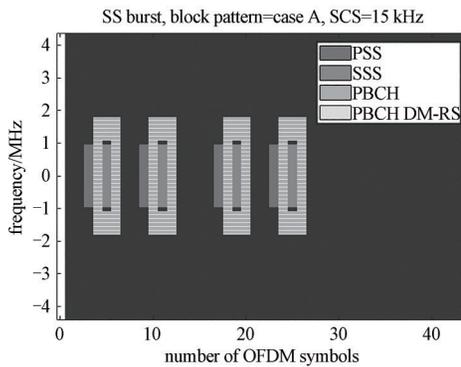


Fig.3 Simulation diagram of SS/PBCH block
图 3 SS/PBCH 块仿真示意图

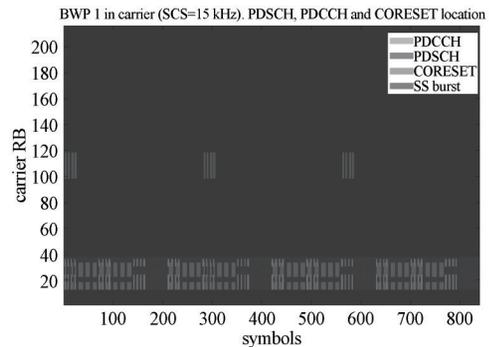


Fig.4 Schematic diagram of partial signal resource block occupation
图 4 部分信号资源块占用示意图

2 5G 信号模糊函数的分析

雷达系统的距离分辨力和多普勒分辨力是雷达探测目标中较为重要的指标, 而信号的模糊函数综合了其时域和频域的特性, 使得它成为衡量外辐射源信号性能、表征雷达分辨能力的有力工具。当模糊函数具有理想的图钉状结构时, 会获得较高的距离分辨力和多普勒分辨力^[21]。而实际得到的信号模糊函数图, 除了在零时延、零多普勒位置存在主峰外, 在其他特定位置还包含多个副峰。过强的副峰不仅会产生虚警, 甚至会淹没弱小目标的信号主峰, 严重影响后续信号的探测和处理^[22-23]。因此有必要对信号的模糊函数进行分析。模糊函数在时域上的计算表达式^[10]为:

$$|A(\tau, f_d)| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)s^*(t+\tau)e^{-j2\pi f_d t} dt \right| \quad (6)$$

式中: $A(\tau, f_d)$ 是模糊响应; $s(t)$ 为信号复包络; τ 为时延; f_d 为多普勒频移。由式(6)可知模糊函数可以看作 2 个目标信号回波复包络的时间-频率复合自相关函数。该模糊函数以三维图的形式呈现, x 轴表示时延(即距离维度), y 轴是多普勒频域, z 轴是匹配滤波器输出功率的归一化结果^[24-25]。根据模糊函数峰值所在的位置, 可确定当前信号探测目标的距离和多普勒。对模糊函数进行分析时, 不仅要考虑主瓣的宽度, 还要考虑副瓣造成的影响。

本次仿真系统是运行在 Matlab 上的 5G NR 下行链路仿真系统。仿真模拟了 PDCCH 和 PDSCH 信道以及参考信号和同步信号的生成, 并采用了 5G 中提出的新概念: 部分带宽(Bandwidth Part, BWP)。BWP 可以理解为小区总带宽的一个子集带宽, 通过自适应配置 BWP 的大小来灵活利用系统带宽。仿真中所用的 5G 信号的循环前缀配置为 NCP, 关键参数如表 2 所示。图 5 给出了子载波间隔为 15 kHz 时的信号模糊函数图。如图 5 所示, 5G NR 信号的模糊函数除了存在 1 个主峰, 还存在着许多副峰。下面将分析这些副峰的具体位置及产生原因。

2.1 对目标探测距离存在影响的副峰

5G NR 信号模糊函数图的时延剖面如图 6 所示, 可以看出除了位于零时延处的主峰外, 在模糊函数时延维的 66.67 μ s 处还存在着第一种副峰, 如图 6 中 peak A 所示。这种副峰主要是由 5G 信号中 OFDM 符号的循环前缀引起的。每个时隙中第一个 OFDM 符号的 NCP 为 5.21 μ s, 其余 13 个 OFDM 符号的 NCP 为 4.69 μ s, 而数据长度均为 66.67 μ s。因此每隔 66.67 μ s 信号就会发生重复, 使得模糊函数的第一种模糊副峰出现在时延维的 66.67 μ s 处。

虽然这种模糊副峰是由重复的循环前缀引起的，但它只是信号帧内的一个伪周期信号，在模糊函数的多普勒维上并不会形成周期副峰，因此这里仅给出该模糊副峰的时延维分析。将该时延值代入距离模糊计算公式 $c \cdot T_b/2$ ，可得第 1 种副峰的模糊距离约为 10 km。由于这种副峰引起的模糊距离正好处在外辐射源雷达可探测的距离内，当峰值过大时可能会造成虚警，干扰了外辐射源雷达对目标的参数估计能力。因此从信号原理的角度出发，考虑将参考信号中循环前缀的相关部分剔除，并将处理后的参考信号与回波信号进行相关处理来抑制该副峰。

表 2 5G NR 物理层的关键参数

Table2 Key parameters of the 5G NR physical layer

parameter name	parameter value	parameter name	parameter value
channel bandwidth/MHz	40	the SCS of signal/kHz	15
the length of the wireless frame/ms	80	the number of RBs corresponding to different SCS	216
number of RBs occupied by BWP	25	time domain allocation of SS/PBCH block/kHz	Case A:15
period of SS/PBCH block/ms	20	mapping type of PDSCH	A
RBOffset of CSI-RS	12	frequency density of CSI-RS	1
slot period of Coreset/ms	5	configuration type of DM-RS	2

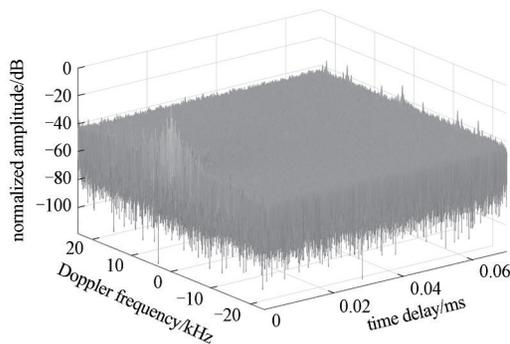


Fig.5 Ambiguity function of 5G signal
图 5 5G 信号的模糊函数

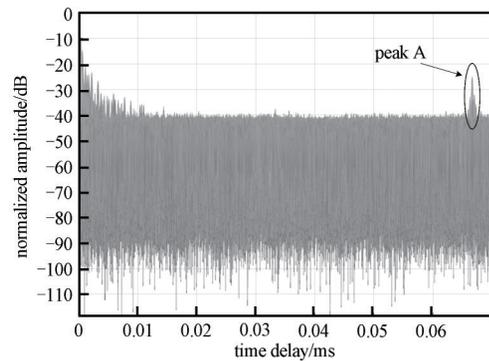


Fig.6 Ambiguity function of 5G signal in the time delay dimension
图 6 5G 信号的模糊函数时延维切面

此外值得注意的是，由于 5G NR 和 LTE 使用了同样的符号调制方式，这种类型的模糊副峰在 4G 信号的模糊函数图中也有出现，但是因为 4G 信号的子载波间隔只有 15 kHz 一种情况，故该副峰仅出现在时延维的 66.67 μ s 处。而 5G NR 信号由于子载波间隔和调制符号的长度可变，其模糊函数中第 1 种副峰的位置也随着信号帧结构中的参数相应变化。图 6 仅展示了当 $\mu=0$ ，即子载波间隔为 15 kHz 时的 5G NR 信号模糊函数时延维上的副峰，其余不同情况详见表 3。在针对不同参数配置下的 5G NR 信号，该类副峰出现的位置各不相同，通过信号处理的方式抑制该副峰时，需要根据信号中的参数配置进行相应的调整。同时 5G NR 中采用 BWP 的形式使得在不同频段会有不同的信号帧结构。因此采用常规信号处理的方式抑制该类副峰时操作较为复杂，可以考虑将其转换为优化函数进行抑制处理。

表 3 5G NR 信号在不同信号参数配置下 Peak A 出现的位置

Table3 The position of peak A in the 5G NR signal under different signal parameter configurations

μ	SCS/kHz	symbol length/ μ s	position of peak A in the time delay dimension/ μ s
0	15	66.67	66.67
1	30	33.33	33.33
2	60	16.67	16.67

第 2 种模糊副峰是在主峰的附近产生的一系列类似于 sinc 函数旁瓣状的副峰，如图 7 标记 peak B 所示。该峰值产生的原因与 4G LTE 的 sinc 函数旁瓣状的副峰类似^[11]，主要是由于 5G 下行链路频谱的不连续导致的。从图中可以看到，该副峰峰值并非连续下降，而是在下降的过程中幅度仍有起伏且旁瓣位置并不相同。但该副峰距离主瓣很近，因此通过模糊函数图的时延维计算其探测范围时，往往在可探测范围内容易产生虚警，因此要对该类模糊副峰进行抑制。吕晓德在文中提到通过频谱合成的方法将不连续的频谱合成为一个连续的频谱，并对合成后的频谱加窗，实现对该类副峰的抑制。考虑到 5G 信号频谱合成涉及到较为复杂的操作，本文后续将把该类副峰的抑制转化为优化函数求解进行抑制。

2.2 对目标探测速度存在影响的副峰

第 3 种模糊副峰是由无线帧传输过程中周期为 20 ms 的 SS/PBCH 块引所起的，其所对应的模糊距离为

3 000 km。由周期信号的时频域对应关系可知，这种副峰在多普勒维对应周期为 50 Hz 的模糊副峰，如图 8 中 peak C 所示。从前面的分析可以看出，该模糊副峰对应的模糊距离远远超过了 5G 外辐射源雷达可以探测到的最大范围，而它对应的多普勒维的模糊副峰出现在 50 Hz 的整数倍处，其对应的单基地速度为 5 m/s，在 5G 基站可探测的目标速度范围内。因此需要抑制该信号在多普勒维产生的副峰。

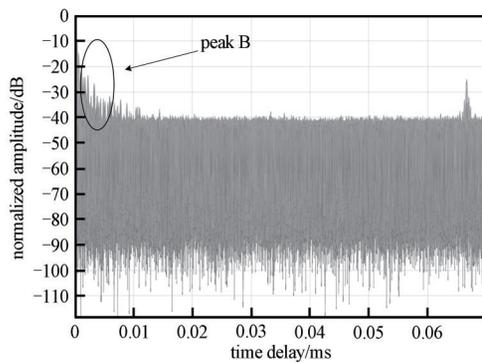


Fig.7 Simulation diagram of the second ambiguity peak
图7 第二种副峰示意图

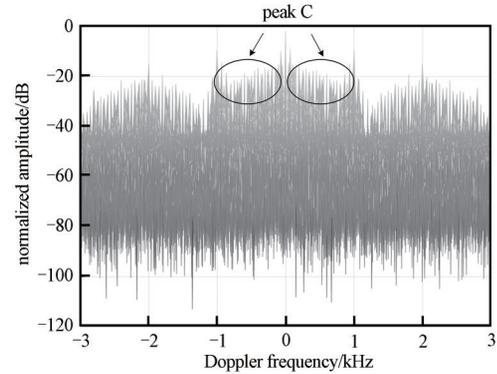


Fig.8 Partial zoomed in Doppler view of ambiguity function
图8 模糊函数的多普勒维的局部放大图

需要指出的是，4G LTE 信号中的 PSS、SSS 和 PBCH 位于载波的中心，周期固定为 5 ms，且必须覆盖整个小区，因此在 4G LTE 信号的模糊函数图中出现了以半帧(即 5 ms)为重复周期的模糊副峰 CRS。而在 5G NR 中，PSS、SSS 和 PBCH 共同构成 SS/PBCH 块。其周期可以配置为 5 ms、10 ms、20 ms、40 ms、80 ms 或 160 ms。在每个周期内，多个 SS/PBCH 块被限制在 5 ms 的半帧内，SS/PBCH 块的数目及各 SS/PBCH 块的起始符号受子载波间隔和信号所在频段的限制，不同情况下 SS/PBCH 块的时域位置如表 4 所示。

表4 5种不同情况下 SS/PBCH 块的时域位置

Table4 Time domain position of SS/PBCH block in five different situations

SCS	symbol position	$f \leq 3$ GHz	$3 \text{ GHz} < f \leq 6$ GHz	$f > 6$ GHz
Case A:15 kHz	{2,8}+14n	$n = 0,1$	$n = 0,1,2,3$	—
Case B:30 kHz	{4,8,16,20}+28n	$n = 0$	$n = 0,1$	—
Case C:60 kHz	{2,8}+14n	$n = 0,1$	$n = 0,1,2,3$	—
Case D:120 kHz	{4,8,16,20}+28n	—	—	$n = 0,1,2,3,5,6,7,8,10,11,12,13,15,16,17,18$
Case E:240 kHz	{8,12,16,20,32,36,40,44}+28n	—	—	$n = 0,1,2,3,5,6,7,8$

由图 9 的模糊函数的多普勒剖面图可得，第 4 种模糊副峰是出现在 0.2 kHz 的整数倍处的周期性模糊副峰，如图 9 中 peak D 所示。根据周期信号的时频域对应关系可得，该副峰在时延维也存在以 5 ms 为周期的重复性模糊副峰。这种副峰主要是由 5G NR 中新引入的控制资源集合(CORESET)造成的周期重复。CORESET 封装了 PDCCH 在频域上占据的频段以及在时域中占用的 OFDM 符号，用于解码 PDCCH 信号。

本仿真中设置 CORESET 在时域的周期为 5 个时隙，因此模糊函数在时延维以 5 ms 为周期重复出现副峰。反观 4G 信号中不存在该信号，因此 4G 信号的模糊函数图中不会出现由该信号引起的副峰。通过模糊距离计算公式 $c \cdot T_r / 2$ 可得，该模糊副峰对应的模糊距离 750 km 远超出了外辐射源雷达可探测的最大范围，同时该副峰对应的探测目标的单基地速度为 20 m/s，在基站可探测的目标速度范围内，因此不可忽略该副峰在多普勒维造成的影响。现有文献少有提及对多普勒维副峰的抑制，这里可以针对性地对其进行抑制，或转化为优化函数进行抑制处理。

2.3 对目标探测无影响的副峰

同样的，基于模糊函数的多普勒剖面图，容易分析得出第 5 种模糊副峰出现在 1 kHz 的整数倍处，如图 10 中 peak E 所示。根据周期信号的时频域对应关系可得，在时延维也存在以 1 ms 为周期的重复性模糊副峰。通过对比分析 4G 信号和 5G 信号的帧结构可以发现，4G 信号在时域上以子帧为单位进行资源分配，每个子帧中都存在解调信号 CRS，进而引起子帧间的模糊副峰。5G NR 既可以按时隙为单位，也可以按符号为单位进行时域资源分配，通常情况下，每个时隙内前 1~3 个符号为 PDCCH 信道，剩下 11~13 个符号为 PDSCH 信道。为了避免所谓“永远存在”的信号，5G NR 取消了持续性发送的 CRS，而在 PDCCH、PDSCH 和 PBCH 的设计中都使用了相应的 DM-RS，并用 DM-RS 作为解调信号进行信道估计。

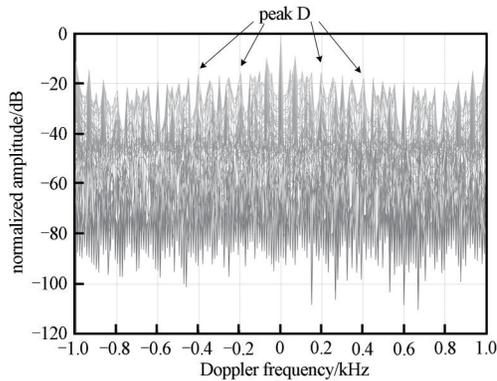


Fig.9 Simulation diagram of the fourth ambiguity peak
图9 第4种模糊副峰示意图

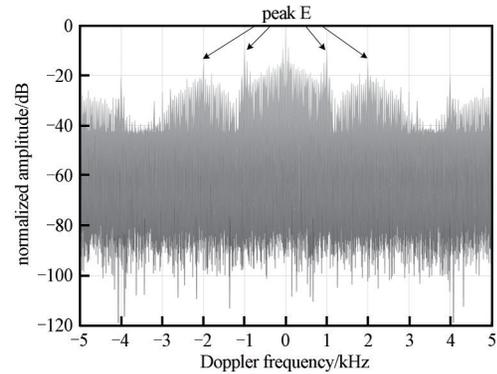


Fig.10 Ambiguity function of 5G signal in the Doppler view profile
图10 5G信号模糊函数的多普勒剖面

本次仿真所使用的频段为 3 GHz，子载波间隔设置为 15 kHz，每个时隙长度为 1 ms。因此在 5G 信号模糊函数时延维上出现了以 1 ms 为周期的模糊副峰，而不会产生由 4G LTE 中 CRS 引起的模糊副峰。同样地，该模糊副峰的位置并不是固定的，而是随着 5G NR 信号子帧结构的变化而产生变化，不同子帧长度下的模糊副峰的具体位置如表 5 所示。由公式 $c \cdot T_b / 2$ 计算出该模糊副峰所对应的模糊距离为 150 km，超过了外辐射源雷达可探测到的最大范围(根据雷达方程^[26]，5G 外辐射源雷达最大探测距离为 20 km)。此外，因 5G 单基站的目标探测范围有限，5G NR 信号更适合用于探测慢速目标(如行人、无人机等各种速度不超过 150 km/h 的低小慢目标)^[10]。该模糊副峰对应的单基地目标速度为 50 m/s，也超过了基站可探测的目标速度上限。因此，这种模糊副峰对外辐射源雷达的探测性能造成的影响可忽略不计。

表5 不同子帧长度下第2种模糊副峰的具体位置
Table5 The specific location of the second ambiguity peak at different sub-frame lengths

μ	SCS/kHz	the number of slots contained in each subframe signal	length of each slot/ms	the position of peak B in the Doppler dimension/kHz
0	15	1	1.00	1
1	30	2	0.50	2
2	60	4	0.25	4

在对上述影响目标探测的副峰进行处理时，除了可以使用常规的信号处理手段去抑制特定的模糊副峰，还可以将该问题转化为优化函数对所有类型的副峰统一处理。但需要注意的是，在对副峰进行抑制的同时，会造成信噪比能量的损失，主瓣也会相应地展宽。这也是后续抑制副峰时需要考虑的因素。

3 结论

本文首先从外辐射源雷达入手，引入了基于 5G 信号的外辐射源雷达探测系统；然后对 5G 信号帧结构、物理资源结构以及下行物理信道进行分析；最后研究了基于 5G 信号的模糊函数特性，并将其与 4G 信号的模糊函数进行了对比分析。

5G 信号的模糊函数与 4G 信号相比，其相同点在于：仍然存在由循环前缀和同步信号引起的模糊副峰；不同点在于：5G 信号模糊函数中由循环前缀引起的模糊副峰在时延维的位置灵活可变，且会对目标探测造成一定影响。5G 信号中同步信号引起的模糊副峰的位置也由同步信号的配置决定，并非一成不变的。此外，5G 信号中新引入的 CORESET 也在模糊函数图中形成了周期的模糊副峰，这种模糊副峰可能会在多普勒频域探测目标时引起干扰，甚至造成虚警；5G 信号也取消了 4G 中的 CRS，但存在由 DM-RS 引起的模糊副峰，不过该模糊副峰在时延维和多普勒维均超出了最大探测范围，可以不予考虑。

综上，基于 5G 信号的外辐射源雷达在探测低空慢速目标时，模糊函数中的一些副峰会对雷达的探测性能产生一定的影响，但仍在可接受范围之内，并可以考虑采取相应的措施予以抑制。此外，雷达的分辨力取决于模糊图中心主瓣的宽度，在抑制时延维和多普勒维上对低空探测性能造成干扰的旁瓣的同时，还要尽可能地减少主瓣的展宽。

参考文献：

[1] KUSCHEL H, CRISTALLINI D, OLSEN K E. Tutorial: passive radar tutorial[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems

- Magazine, 2019,34(2):2–19. doi:10.1109/MAES.2018.160146.
- [2] 万显荣,易建新,占伟杰,等. 基于多照射源的被动雷达研究进展与发展趋势[J]. 雷达学报, 2020,9(6):939–958. (WAN Xianrong, YI Jianxin, ZHAN Weijie, et al. Research progress and development trend of the multi-illuminator-based passive radar[J]. Journal of Radars, 2020,9(6):939–958.) doi:10.12000/JR20143.
- [3] WANG Qing, DU Panfei, YANG Jingyu, et al. Transferred deep learning based waveform recognition for cognitive passive radar[J]. Signal Processing, 2019(155):259–267.
- [4] WANG Haitao, LYU Xiaoyong, ZHONG Liping. Interference-to-noise ratio estimation in long-term evolution passive radar based on cyclic auto-correlation[J]. Electronics Letters, 2021,57(9):375–377.
- [5] 陈刚,王俊,王珏,等. GSM信号外辐射源雷达同频干扰抑制方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017,44(6):37–42. (CHEN Gang, WANG Jun, WANG Jue, et al. Method of co-channel interference cancellation for the GSM based PBR[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2017,44(6):37–42.) doi:10.3969/j.issn.1001–2400.2017.06.007.
- [6] 翟永惠,吴江. 采用机会照射源的杂波抑制与弱目标检测方法[J]. 信号处理, 2016,32(2):227–236. (ZHAI Yonghui, WU Jiang. A clutter cancellation and weak target detection method utilizing the illuminators of opportunity[J]. Journal of Signal Processing, 2016,32(2):227–236.) doi:10.16798/j.issn.1003–0530.2016.02.014.
- [7] 杨志峰,郑恒,王海环. 基于总体最小二乘的外辐射源雷达相消算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(5):793–796, 801. (YANG Zhifeng, ZHENG Heng, WANG Haihuan. A direct signal cancellation method based on TLS in passive radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(5):793–796,801.) doi:10.11805/TKYDA2019145.
- [8] RAJA ABDULLAH R S A, SALAH A A, ISMAIL A, et al. Experimental investigation on target detection and tracking in passive radar using long-term evolution signal[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2016,10(3):577–585.
- [9] 吕晓德,张汉良,刘忠胜,等. 基于LTE信号的外辐射源雷达同频基站干扰抑制方法研究[J]. 电子与信息学报, 2019,41(9):2123–2130. (LYU Xiaode, ZHANG Hanliang, LIU Zhongsheng, et al. Research on co-channel base station interference suppression method of passive radar based on LTE signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019,41(9):2123–2130.) doi:10.11999/JEIT180904.
- [10] 王本静,易建新,万显荣,等. LTE外辐射源雷达帧间模糊带分析与抑制[J]. 雷达学报, 2018,7(4):514–522. (WANG Benjing, YI Jianxin, WAN Xianrong, et al. Inter-frame ambiguity analysis and suppression of LTE signal for passive radar[J]. Journal of Radars, 2018,7(4):514–522.) doi:10.12000/JR18025.
- [11] 吕晓德,张汉良,杨璟茂,等. 基于LTE信号的外辐射源雷达副峰特性及抑制方法研究[J]. 电子与信息学报, 2018,40(10):2498–2505. (LYU Xiaode, ZHANG Hanliang, YANG Jingmao, et al. Research on characteristics and suppression methods of side peaks of passive radar based on LTE signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018,40(10):2498–2505.) doi:10.11999/JEIT180019.
- [12] 唐松. 5G NR R15 R&S信号产生与分析方案[J]. 信息通信技术与政策, 2018(10):76–79. (TANG Song. Solution for 5G NR R15 R&S signal generation and analysis[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2018(10):76–79.) doi:10.3969/j.issn.1008–9217.2018.10.021.
- [13] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical channels and modulation v15.1.0:3GPP TS 38.211[S/OL]. [2021–09–02]. https://panel.castle.cloud/view_spec/38211-f10/.
- [14] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Multiplexing and channel coding v15.1.1: 3GPP TS 38.212[S/OL]. [2021–09–02]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3214>.
- [15] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical Layer Procedures for Control v15.1.0:3GPP TS 38.213[S/OL]. [2021–09–02]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3215>.
- [16] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical Layer Procedures for Data v15.1.0:3GPP TS 38.214[S/OL]. [2021–09–02]. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3216>.
- [17] 刘亚楠,刘冰,王珏. 基于2.6 GHz/3.5 GHz频段的5G NR仿真研究[J]. 通信技术, 2020,53(11):2687–2693. (LIU Yanan, LIU Bing, WANG Jue. 5G NR simulation based on 2.6 GHz/3.5 GHz band[J]. Communications Technology, 2020,53(11):2687–2693.) doi:10.3969/j.issn.1002–0802.2020.11.012.
- [18] 王晓云,刘光毅,丁海煜,等. 5G技术与标准[M]. 北京:电子工业出版社, 2019. (WANG Xiaoyun, LIU Guangyi, DING Haiyu, et al. 5G new radio technology and standards[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2019.)
- [19] 范艺芳. 5G系统下行数据信道信号检测的研究与实现[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2020. (FAN Yifang. Research and

- implementation of signal detection for physical downlink shared channel in 5G system[D]. Chongqing, China: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.)
- [20] 张建国,杨东来,徐恩,等. 5G NR 物理层规划与设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2020. (ZHANG Jianguo,YANG Donglai,XU En,et al. 5G NR physical layer planning and design[M]. Beijing:Posts & Telecom Press, 2020.)
- [21] 左家骏,杨瑞娟,程伟,等. OFDM 雷达通信共享信号距离旁瓣抑制研究[J]. 信号处理, 2020,36(10):1662–1667. (ZUO Jiajun, YANG Ruijuan,CHENG Wei,et al. Range side lobe suppression of integrated radar and communication signals based on OFDM [J]. Journal of Signal Processing, 2020,36(10):1662–1667.) doi:10.16798/j.issn.1003–0530.2020.10.005.
- [22] 张卫,唐希源,顾红,等. OFDM 雷达信号模糊函数分析[J]. 南京理工大学学报, 2011,35(4):513–518. (ZHANG Wei,TANG Xiyuan,GU Hong,et al. Ambiguity function analysis of OFDM radar signals[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011,35(4):513–518.) doi:10.14177/j.cnki.32–1397n.2011.04.016.
- [23] 袁春姗. 基于目标加速度的 DTTB 信号模糊函数副峰抑制算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(5):729–735. (YUAN Chunshan. DTTB signals side peaks suppression algorithms based on target acceleration[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(5):729–735.) doi:10.11805/TKYDA201505.0729.
- [24] 施祥同,王虎,陈建军,等. OFDM 雷达信号的宽带模糊函数性能分析[J]. 雷达科学与技术, 2010,8(6):554–558. (SHI Xiangtong, WANG Hu, CHEN Jianjun, et al. Wideband ambiguity function of OFDM radar signal[J]. Radar Science and Technology, 2010,8(6):554–558.) doi:10.3969/j.issn.1672–2337.2010.06.013.
- [25] 张霄霄,梁兴东,王杰,等. 融合失配处理和 LMS 滤波的雷达通信一体化 OFDM 信号距离旁瓣抑制技术[J]. 信号处理, 2021, 37(9):1727–1738. (ZHANG Xiaoxiao,LIANG Xingdong,WANG Jie,et al. Range sidelobe suppression using mismatching and LMS adaptive filter for radar communication integrated OFDM signal[J]. Journal of Signal Processing, 2021,37(9):1727–1738.) doi:10.16798/j.issn.1003–0530.2021.09.017.
- [26] 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1984. (DING Lufei. Principles of radar[M]. Xi'an: Northwest Telecommunications Engineering Institute Press, 1984.)

作者简介:

高靖霞(1997–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理 .email:jingxia7617@163.com.

廖可非(1984–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达成像、RCS 测量、认知雷达.

王海涛(1986–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为外辐射源雷达信号处理.

欧阳缮(1960–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理、通信信号处理.