文章编号：2095-4980(2024)06-0679-09

太赫兹频段OFDM一体化波形的雷达探测性能分析

徐利民[a,b]，付松年[a,b]，彭　迪[a,b]，秦玉文[*a,b]

(广东工业大学 a.信息工程学院；b.通感融合光子技术教育部重点实验室，广东 广州 510006)

摘　要：传统的正交频分复用(OFDM)信号在太赫兹通信系统中通常会面临峰均功率比(PAPR)过高的问题，严重降低功率放大器的效率，恶化太赫兹链路的非线性效应。恒模雷达-通信一体化波形可以抑制PAPR的影响。本文采用模糊函数作为评价标准，从距离和速度两方面分析和比较了太赫兹频段正交频分复用-16阶正交幅相调制-线调频(OFDM-16QAM-LFM)、正交频分复用-二进制相移键控-线调频(OFDM-BPSK-LFM)、正交频分复用-最小相移键控-线调频(OFDM-MSK-LFM)3种OFDM一体化波形的雷达探测性能。数值仿真结果表明，OFDM-16QAM-LFM波形在太赫兹频段的距离和速度探测性能良好，但PAPR过高；OFDM-BPSK-LFM、OFDM-MSK-LFM波形采用相位调制代替幅度-相位调制，保持恒定包络特性；OFDM-BPSK-LFM一体化波形的距离分辨力不会随着子载波数量增加而恶化，但速度分辨力随着子载波数量的增加而受到很大影响，不适宜用于高速运动状态下多目标的速度检测；OFDM-MSK-LFM波形可承载更多的子载波，适应复杂场景下的多载波雷达探测需求。本文方法为不同应用场景的一体化波形选择提供了参考。

关键词：太赫兹；雷达-通信一体化；正交频分复用；恒包络波形；模糊函数

中图分类号：TN928　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA2024111

Radar performance analysis of OFDM-based jointed radar and communication waveforms in the terahertz band

XU Limin[a,b]，FU Songnian[a,b]，PENG Di[a,b]，QIN Yuwen[*a,b]

(a.School of Information Engineering；b.Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication，Ministry of Education，Guangdong University of Technology，Guangzhou Guangdong 510006，China)

Abstract： Traditional Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) signals in terahertz communication systems usually bring about high Peak to Average Power Ratio(PAPR) problems that would seriously degrade the power amplifier efficiency and deteriorate the nonlinear effect of terahertz link. The design of constant-envelope OFDM based Integrated Sensing And Communication(ISAC) waveforms can suppress the harmful effects of high PAPR. The Ambiguity Function is used as the criteria for the range and velocity performance evaluation of three OFDM-based ISAC waveforms in the terahertz bands, namely, OFDM-16QAM(16-Quadrature Amplitude Modulation) -LFM(Linear Frequency Modulation), OFDM-BPSK(Binary Phase Shift Keying) -LFM, OFDM-MSK(Minimum Shift Keying) -LFM. The numerical simulation results demonstrate that, OFDM-16QAM-LFM waveform has excellent range-velocity performance but serious PAPR problems. OFDM-BPSK-LFM, OFDM-MSK-LFM waveforms replace the amplitude-phase modulation with phase modulation, thus maintaining constant-envelope characteristics. The range detection capability of OFDM-BPSK-LFM waveform does not degrade with the increase of subcarriers, while the velocity detection capability is seriously affected. Therefore OFDM-BPSK-LFM waveform is not suitable for the velocity detection of fast-moving objects. OFDM-MSK-LFM waveform can tolerate more subcarriers, making it suitable for multi-carrier radar detection under complex circumstances. This work provides references for the choice of ISAC waveforms in different application scenarios.

收稿日期：2024-02-27；**修回日期：**2024-05-04

[*]**通信作者：**秦玉文　email:qinyw@gdut.edu.cn

Keywords：terahertz；joint radar and communication waveform；Orthogonal Frequency Division Multiplexing；constant envelope；Ambiguity Function

感知-通信一体化是6G通信的研究热点，太赫兹通信技术作为未来6G和Beyond 6G(B6G)通信的重要技术方案，可有效解决短程局域超高速通信、数据回传和未来大容量卫星通信等领域的需求[1]。同时，太赫兹频段丰富的频谱资源在指纹波谱分析、雷达成像、高精确度感知和定位方面具有重要的应用前景。毫米波、太赫兹频段的通信和感知在硬件、算法、波形和功能实现等方面从共存走向一体化融合是未来通信的发展趋势[2-5]。

太赫兹频段的雷达-通信一体化技术是解决频谱拥挤、减少硬件资源消耗、增加信息服务内容的重要技术手段。雷达-通信一体化波形是实现共用太赫兹通信收发系统硬件资源和共享频谱带宽的关键技术之一，对太赫兹频段的一体化波形进行设计和优化，会直接影响太赫兹雷达-通信系统的性能。正交频分复用(OFDM)波形是4G和5G通信中的基本波形，研究太赫兹频段OFDM雷达-通信一体化波形的设计和优化方法，对于进一步深刻理解不同形式的OFDM波形在太赫兹通感融合系统中的性能具有重要意义。传统OFDM波形通常面临峰均值比(PAPR)过高的问题，严重影响功率放大器的工作效率，并带来太赫兹信号链路的非线性问题[6-8]。

本文采用模糊函数作为一体化波形的雷达探测能力评价标准，由常见的OFDM-16QAM-LFM一体化波形开始，从距离和速度两方面分析了OFDM-16QAM-LFM在太赫兹频段的雷达探测能力和PAPR问题。随后，为克服16QAM格式中PAPR过高问题，保持恒定包络，将调制格式设计成相位调制，仿真分析了OFDM-BPSK-LFM和OFDM-MSK-LFM一体化波形在太赫兹频段的雷达探测性能。仿真结果表明，随着子载波数目增加，OFDM-BPSK-LFM一体化波形的距离分辨力不会随着子载波数量增加而恶化，但速度分辨力随着子载波数量增加而受到很大影响；OFDM-MSK-LFM一体化波形的距离和速度探测能力随着子载波数量增加只有轻微恶化，因而可承载更多的子载波数量，适应复杂场景下多载波的雷达探测需求。

1 太赫兹频段OFDM-16QAM-LFM一体化波形设计与性能分析

高阶数字调制格式16QAM具有较高的通信频谱效率，调频连续波LFM也是雷达的基本波形，在测距和测速方面具有比较理想的精确度和相对成熟的处理算法体系。16QAM与LFM结合，可以保持各自的优势，形成新的雷达-通信一体化波形[9-10]。固定频率f_c的16QAM信号可表示为：

$$S_{\mathrm{QAM}}(t)=a_0(t)\cos(2\pi f_c t)-a_e(t)\sin(2\pi f_c t) \tag{1}$$

式中$a_0(t)$、$a_e(t)$分别是16QAM信号的同相分量和正交分量。

在一体化波形设计时，载波应该采用矩形窗口的LFM脉冲信号，即：

$$S_{\mathrm{LEM}}(t)=\mathrm{rect}\left(\frac{1}{T}\right)\times A\times\exp\left(\mathrm{j}2\pi f_c t+\mathrm{j}\pi\mu t^2\right) \tag{2}$$

$$\mathrm{rect}\left(\frac{1}{T}\right)=\begin{cases}1, |t|\leqslant\dfrac{T}{2}\\ 0, |t|>\dfrac{T}{2}\end{cases} \tag{3}$$

式中：A为幅度值；μ为线性调频信号的啁啾率，由雷达脉冲宽度T和带宽B决定，即：

$$\mu=\frac{B}{T} \tag{4}$$

此时，单路16QAM-LFM雷达通信一体化信号的计算式为16QAM和LFM信号的乘积：

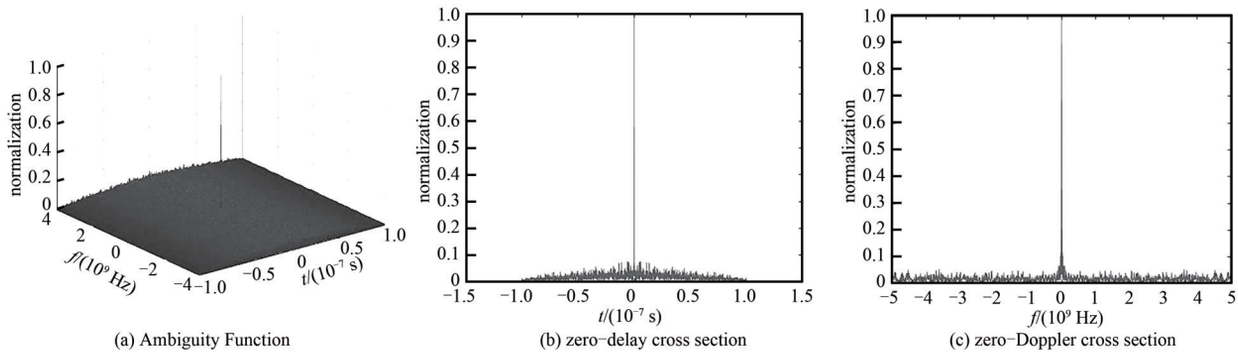
$$S(t)=A\times\mathrm{rect}\left(\frac{1}{T}\right)\left[a_0(t)\cos(2\pi f_c t+\pi\mu t^2)-a_e\sin(2\pi f_c t+\pi\mu t^2)\right] \tag{5}$$

模糊函数是描绘雷达波形距离分辨力和速度分辨力的关键性能指标，传统定义为：

$$\chi(\tau,\varepsilon)=\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}\tilde{s}(t)\tilde{s}^*(t-\tau)\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi\varepsilon t}\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中$s(t)$为脉冲信号的归一化复包络。

图1为OFDM-16QAM-LFM一体化波形在载波起始频率为300 GHz的单个子载波的雷达模糊函数和零时延截面、零多普勒截面，以下模糊函数的高度均归一化为单位1。仿真参数设置：单个子载波符号数为16，子载波数为64，相邻子载波间隔Δf=960 kHz，采样频率f_s=10 GHz，循环前缀(Cyclic Prefix，CP)占用时间为1/4个符号时间，符号总的等效时长为1.302 μs。从图中可以判断16QAM-LFM的雷达模糊函数尖锐，近似图钉形状，距离和速度分辨力均良好。



(a) Ambiguity Function　(b) zero-delay cross section　(c) zero-Doppler cross section

Fig.1 Ambiguity Function, zero-delay and zero-Doppler cross sections for OFDM-16QAM-LFM ISAC waveform at carrier frequency of 300 GHz

图1 300 GHz载波频率OFDM-16QAM-LFM一体化波形的模糊函数和零时延、零多普勒截面

传统的OFDM-16QAM单个子载波的信号相对能量如图2所示，动态范围较大，PAPR理论计算数值为6 dB。这对射频前端放大器提出了更高的线性度要求，同时也使太赫兹倍频、混频链路的非线性损伤更严重，增加了硬件设计的成本[9-10]。因此，以相位调制替代幅度-相位调制[11-16]，研究包络恒定的一体化波形。由于太赫兹频段具有丰富的频谱资源，仅用相位调制仍可获得足够高的通信速率。

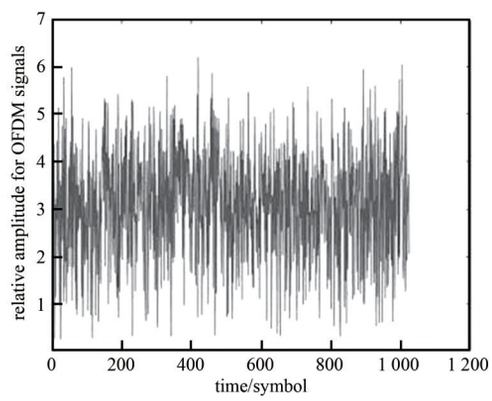


Fig.2 Relative amplitude for traditional OFDM-16QAM signals

图2 传统OFDM-16QAM信号相对能量

2 太赫兹频段OFDM恒模一体化波形的雷达性能分析

采用常见的二进制相移键控(BPSK)和最小频移键控(MSK)替代16QAM调制，设计恒模的一体化波形，使PAPR理论值保持为0 dB。通过数值仿真，分析不同子载波数量、不同载波频率时的一体化波形在太赫兹频段的雷达模糊函数和零时延、零多普勒截面性能。

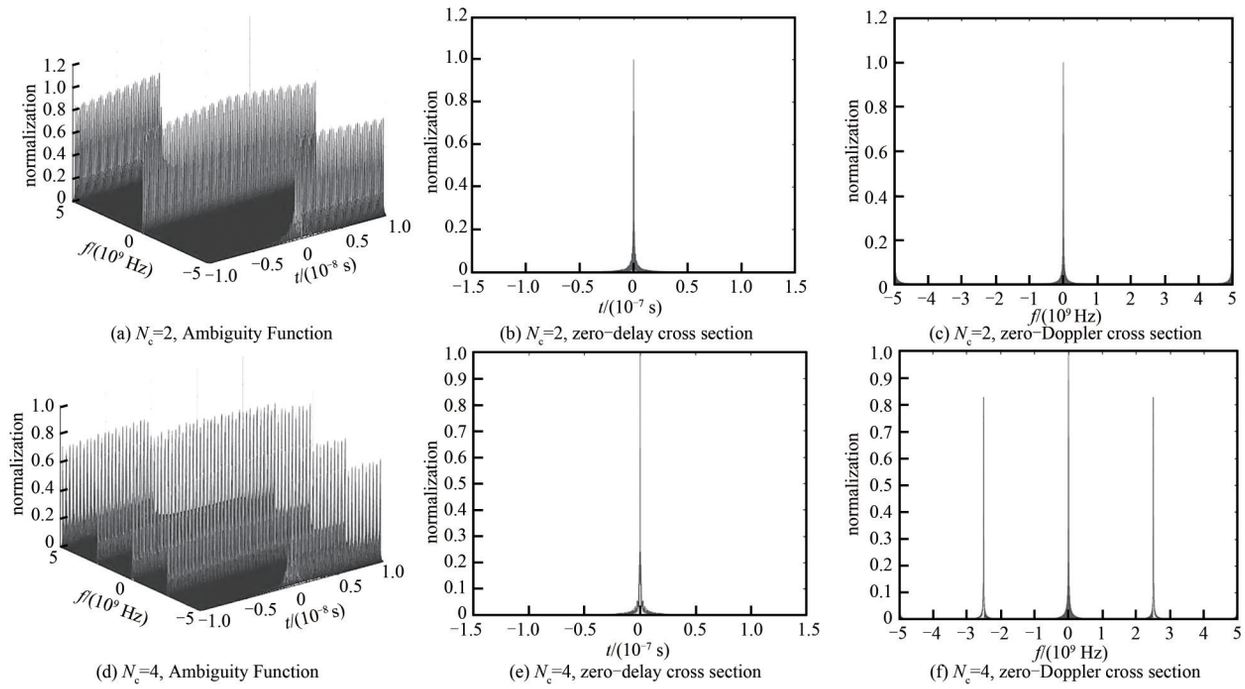
2.1 OFDM-BPSK-LFM一体化波形

载波频率为140 GHz的OFDM-BPSK-LFM雷达-通信一体化在不同子载波数(N_c=2和4)下的雷达模糊函数和零时延、零多普勒截面如图3所示。仿真参数设置：Symbol符号数为512，LFM扫频起始载波频率为135 GHz，终止频率为145 GHz，采样频率为10 GHz，调频带宽B=2 GHz，啁啾信号时长10.24 μs。

OFDM-BPSK-LFM一体化波形的雷达模糊函数无法保证图钉形状，零时延截面不受OFDM子载波数量影响，但零多普勒截面随着子载波数量的增加，相应地出现了更多的栅瓣，并且副瓣相对主瓣的高度比例很大。仿真数据表明，OFDM-BPSK-LFM一体化波形的距离定位精确度不会随着子载波数量N_c改变，但速度分辨力随着子载波数量而受到很大影响。零多普勒截面的峰值旁瓣比(Peak Side Lobe Ratio，PSLR)在N_c=2时为1.41 dB；N_c=4时为0.45 dB，严重低于实际的雷达系统检测要求。因此，OFDM-BPSK-LFM适用于相对静止或慢速运动目标的精确定位，而不适用于高速运动目标的速度检测。

2.2 OFDM-MSK-LFM一体化波形

采用MSK的基带信号调制过程如图4所示。基带码元先经过差分编码、串/转换后，分为I/Q两路。与对应的载波相乘，最后叠加完成MSK信号的调制。



(a) N_c=2, Ambiguity Function
(b) N_c=2, zero-delay cross section
(c) N_c=2, zero-Doppler cross section
(d) N_c=4, Ambiguity Function
(e) N_c=4, zero-delay cross section
(f) N_c=4, zero-Doppler cross section

Fig.3 Ambiguity Function, zero-delay and zero-Doppler cross sections for OFDM-BPSK-LFM ISAC waveform at carrier frequency of 140 GHz
图3 载波频率为140 GHz的OFDM-BPSK-LFM一体化波形的模糊函数、零时延截面、零多普勒截面

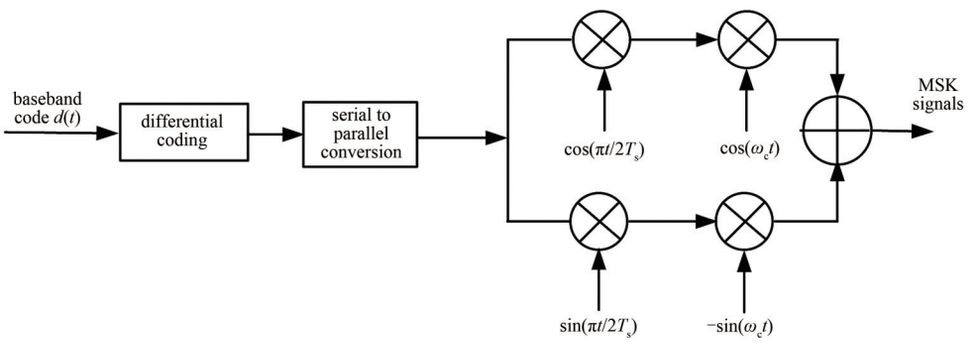


Fig.4 Modulation format of baseband for MSK
图4 最小频移键控(MSK) 的基带信号调制原理

MSK信号具有恒定的信息包络且每两个码元之间相位不会跳变，占用带宽也较小，将其与OFDM-LFM信号相结合可得到一体化信号。MSK信号的第k个码元可表示为：

$$S_{\mathrm{MSK}}=\cos\left(2\pi f_{\mathrm{c}}t+\frac{\pi a_k}{2T_{\mathrm{s}}}+\varphi_k\right) \tag{7}$$

式中：a_k为第k个输入码元，取值为±1；φ_k为第k个码元的相位常数，在时间$kT_{\mathrm{s}}<t\leqslant(k+1)T_{\mathrm{s}}$内保持不变，其作用是在$t=kT_{\mathrm{s}}$处保持相位连续；$T_{\mathrm{s}}$是符号周期。

$$S_{\mathrm{MSK}}=\cos\left(\omega_{\mathrm{c}}t+\frac{a_k\pi}{2T_{\mathrm{s}}}+\varphi_k\right)=\cos\varphi_k\cos\frac{\pi t}{2T_{\mathrm{s}}}\cos\omega_{\mathrm{c}}t-a_k\cos\varphi_k\sin\frac{\pi t}{2T_{\mathrm{s}}}\sin\omega_{\mathrm{c}}t=p_k\cos\frac{\pi t}{2T_{\mathrm{s}}}\cos\omega_{\mathrm{c}}t-q_k\sin\frac{\pi t}{2T_{\mathrm{s}}}\sin\omega_{\mathrm{c}}t \tag{8}$$

基带信号MSK的调制波形如图5所示，图5(a)为基带信号的双极性编码，图5(b)为I/Q路的时域波形，图5(c)为MSK信号的波形和添加高斯白噪声的波形，保持包络恒定，图5(d)为基带信号频谱和调制到载频4GHz的频谱。

2.2.1 子载波数量对雷达探测性能的影响

OFDM-MSK-LFM一体化波形在97 GHz载波频率、采样率6 GHz、LFM带宽10 GHz、脉宽0.2 μs、OFDM子载波数N_c=2,4,8时的模糊函数、零时延截面和零多普勒截面如图6所示。随着N_c的增加，模糊函数和零时延截

面基本不变，但零多普勒截面的栅瓣被逐渐激励出来，最高副瓣水平略微增加，且随着子载波数量增加，更加接近中心主瓣，影响了雷达的速度分辨力。不同子载波数量情况下，零多普勒截面的PSLR如表1所示。OFDM–MSK–LFM在零多普勒截面的副瓣水平比OFDM–BPSK–LFM低很多，获得了比OFDM–BPSK–LFM更高的PSLR。

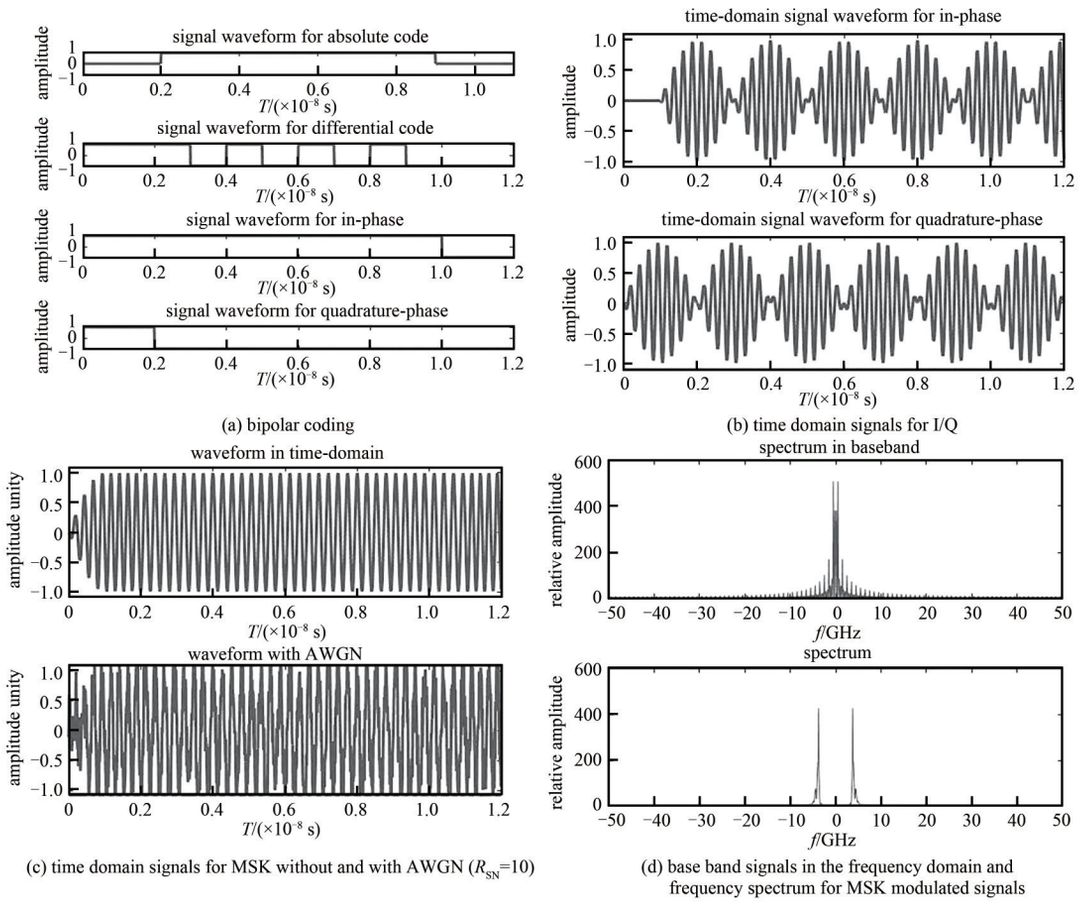


Fig.5 Base band signals for MSK modulation
图5 基带信号MSK调制波形

表1 97 GHz载波频率下OFDM–MSK–LFM一体化波形在不同子载波数量时的零多普勒截面PSLR
Table 1 PSLR of zero–Doppler cross section for OFDM–MSK–LFM ISAC waveform with different numbers of subcarriers at 97 GHz

subcarrier number N_c	2	4	8
PSLR of zero-Doppler cross section/dB	12.04	8.40	7.54

2.2.2 不同载波频率对雷达探测性能的影响

当子载波数量N_c=8时，其余参数不变，改变载波频率97 GHz、140 GHz和300 GHz，其模糊函数、零时延截面和零多普勒截面如图7所示。模糊函数和零时延截面保持不变。不同载波频率下，OFDM–MSK–LFM一体化波形零多普勒截面的PSLR如表2所示，零多普勒截面的副瓣水平基本不变，最高副瓣的位置基本不变，因此PSLR基本不变。

表2 子载波数量为8时，OFDM–MSK–LFM一体化波形在不同载波频率下的零多普勒截面峰值旁瓣比(PSLR)
Table 2 PSLR of zero–Doppler cross section for OFDM–MSK–LFM ISAC waveform with 8 subcarriers at different carrier frequencies

carrier frequency/GHz	97	140	300
PSLR of zero-Doppler cross section/dB	7.54	7.33	7.33

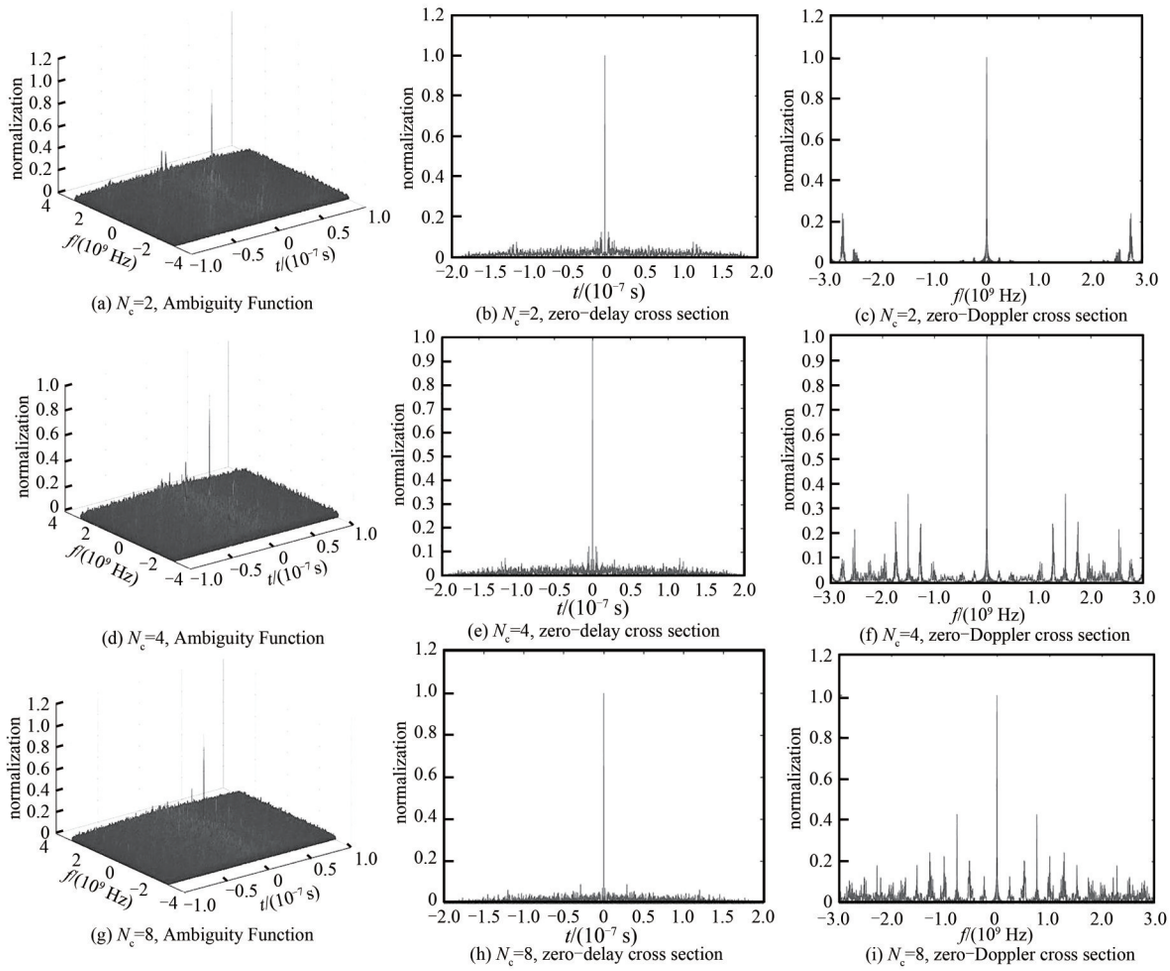


Fig.6 Ambiguity Function, zero-delay and zero-Doppler cross sections for OFDM-MSK-LFM with different numbers of subcarriers(N_c=2,4,and 8 respectively) at carrier frequency of 97 GHz

图6 OFDM-MSK-LFM一体化波形在97 GHz载波频率，不同子载波数N_c的模糊函数、零时延截面和零多普勒截面

3 性能比较与分析

本文通过数值计算，研究了3种OFDM一体化波形在太赫兹频段的雷达探测能力，将模糊函数、零时延截面和零多普勒截面作为一体化波形的时延-多普勒(Delay-Doppler)域的性能评价标准。

OFDM-16QAM-LFM一体化信号具有良好的距离和速度探测性能，适用于低速运动目标的信号检测和高通信速率场景，但会面临太赫兹频段PAPR过高而导致的链路非线性损伤恶化问题。

OFDM-BPSK-LFM一体化信号，通过相位的BPSK调制来承载信息，无需系统结构的特殊设计也能满足恒模特性，误码率主要由BPSK决定。该波形能够满足单目标相对静止或低速运动状态下的感知-通信需求；多载波的模糊函数较差，Doppler域分辨力下降，因此很难满足多目标运动的复杂雷达探测场景。采用传统OFDM雷达算法处理的测距分辨力和性能远优于测速的探测性能，适用于厘米级非接触式、高精确度定位和互联[17]。OFDM-LFM-BPSK通过更精确的相位估计算法，甚至可以达到微米级精确定位，有望用于车床的无接触定位传感和控制[18]。

OFDM-MSK-LFM一体化波形将OFDM、LFM与MSK三种技术相结合，主要利用了OFDM的频谱利用率和信息传输速率、LFM的良好探测性能以及MSK的恒包络特性，模糊函数更趋于图钉形状，很好地保证了雷达的探测能力。在太赫兹频段，速度分辨力随着OFDM子载波数量的增加而轻微恶化，但仍可获得比OFDM-BPSK-LFM更高的PSLR，多子载波情况下，随着载波频率的提高，速度分辨力基本保持不变。OFDM-MSK-LFM信号的通信速率和误码率取决于MSK调制，尽管MSK调制格式牺牲了单子载波的通信速率，太赫兹频段丰富的带宽资源可以提供足够高的总通信速率，因此OFDM-MSK-LFM一体化波形有望满足太赫兹频段的多子载波通信及复杂多目标的距离-速度探测需求。

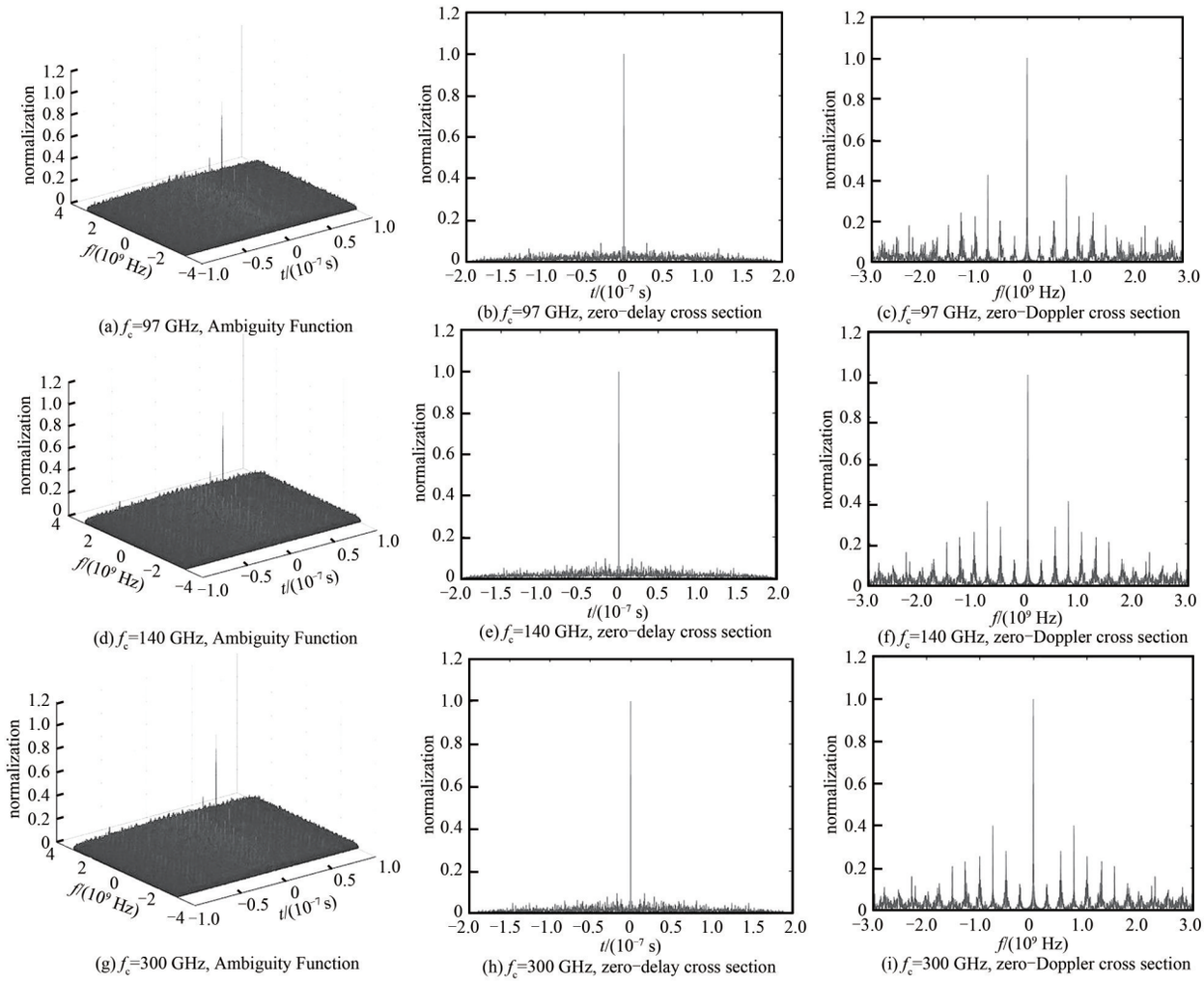


Fig. 7 Ambiguity Function, zero–delay and zero–Doppler cross sections for OFDM–MSK–LFM with N_c= 8 subcarriers at carrier frequency of 97 GHz, 140 GHz, 300 GHz, respectively

图7 子载波数量N_c=8，载波频率分别为97 GHz、140 GHz和300 GHz时的OFDM–MSK–LFM一体化波形的模糊函数和零时延截面、零多普勒截面

4 结论

太赫兹雷达–通信一体化在不同的传输窗口频段(140 GHz、220 GHz、340 GHz等)可以根据应用需求(卫星通信、智慧交通、智能家居、工业物联网和高分辨成像和精确定位等)设计不同的感知–通信一体化(ISAC)波形[2]。作为4G、5G重要的基础波形，OFDM一体化波形将在未来的太赫兹通感融合技术中具有重要地位。

基于OFDM的一体化波形对子载波设计，可以灵活分配通信和雷达资源。本文以雷达模糊函数为评价标准，仿真计算3种常见的OFDM一体化波形在太赫兹频段的雷达探测性能，重点研究了一体化波形的PAPR问题、模糊函数、零时延和零多普勒截面，并讨论了OFDM–16QAM–LFM、OFDM–BPSK–LFM、OFDM–MSK–LFM波形的基本原理和适用场景，为不同应用场景的一体化波形选择提供参考。仿真结果表明，OFDM–16QAM–LFM波形在太赫兹频段的距离和速度探测性能良好，但会面临PAPR过高的问题；OFDM–BPSK–LFM一体化波形的距离分辨力不会随着子载波数量增加而剧烈恶化，但速度分辨力随着子载波数量增加而受到很大影响，不适用于高速运动状态下多目标的速度检测；OFDM–MSK–LFM波形可承载更多的OFDM子载波，适应复杂场景下的多目标雷达探测需求。

本文并未考虑高速移动目标的多普勒频移对信道间的串扰、多雷达传感器的相互干扰、雷达和通信信号之间的干扰等其他重要问题。实际系统应用中，需要采用干扰抑制技术，进一步提高峰值旁瓣比。同时，本文也未讨论一体化波形设计和算法处理中的精确距离–多普勒估计和运动状态下的Doppler校正方法[19–22]，采用低速ADC/DAC处理太赫兹频段高速信号的算法[23–24]以及太赫兹通信与高分辨雷达成像的一体化融合[25–26]等问题。这些都是未来太赫兹感知–通信融合技术中波形设计的重要内容，在后续的工作中将进一步深入研究。在太赫兹通

感融合系统中，一体化波形和收发前端的系统硬件结构应当协同设计和优化，考虑多参数指标的相互关系。随着社会信息化程度的提高，感知-通信融合的程度将增强，所能提供的信息和服务内容将更加丰富，太赫兹频段的OFDM一体化波形也将更趋于成熟和实用。

参考文献：

[1] 邓贤进,姚军,林长星,等. 6G新频谱:太赫兹无线通信之"思与行"[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(2):159-165. (DENG Xianjin,YAO Jun,LIN Changxing,et al. New spectrum for 6G:thinking and action of terahertz wireless communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(2):159-165.) doi:10.11805/TKYDA2021309.

[2] LIU Fan,CUI Yuanhao,MASOUROS C,et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022,40(6):1728-1767. doi:10.1109/JSAC.2022.3156632.

[3] 余显斌,吕治东,李涟漪,等. 太赫兹感知通信一体化波形设计与信号处理[J]. 通信学报, 2022,43(2):76-88. (YU Xianbin,LYU Zhidong,LI Lianyi,et al. Integrated waveform design and signal processing for terahertz sensing communication[J]. Journal on Communications, 2022,43(2):76-88.) doi:10.11959/j.issn.1000.

[4] 彭木根,刘喜庆,刘子乐,等. 6G通信感知一体化理论与技术[J]. 控制与决策, 2023,38(1):22-38. (PENG Mugen,LIU Xiqing,LIU Zile,et al. Principles and techniques in communication and sensing integrated 6G systems[J]. Control and Decision, 2023,38(1):22-38.) doi:10.13195/j.kzyjc.2022.1332.

[5] 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 Bo,HUO Kai,LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019,41(3):739-750.) doi:10.11999/JEIT180515.

[6] STURM C,ZWICK T,WIESBECK W. An OFDM system concept for joint radar and communications operations[C]// VTC Spring 2009 IEEE the 69th Vehicular Technology Conference. Barcelona,Spain:IEEE, 2009:1-5. doi:10.1109/VETECS.2009.5073387.

[7] 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. doi:10.1109/JPROC.2011.2131110.

[8] BRAUN M. OFDM radar algorithms in mobile communication network[D]. Barden:Karlsruher Institut für Technologie, 2014.

[9] 曾浩,吉利霞,李凤,等. 16QAM-LFM雷达通信一体化信号设计[J]. 通信学报, 2020,41(3):182-189. (ZENG Hao,JI Lixia,LI Feng,et al. 16QAM-LFM waveform design for integrated radar and communication[J]. Journal on Communications, 2020,41(3):182-189.) doi:10.11959/j.issn.1000.

[10] 赵忠凯,石妙. 基于OFDM-LFM的雷达通信一体化波形设计[J]. 应用科技, 2021,48(3):73-77. (ZHAO Zhongkai,SHI Miao. Integrated radar and communication waveform design based on OFDM-LFM[J]. Applied Science and Technology, 2021,48(3):73-77.) doi:10.11991/yykj.202011003.

[11] 赵玉振,陈龙永,张福博. 一种基于OFDM-chirp的雷达通信一体化波形设计与处理方法[J]. 雷达学报, 2021,10(3):453-466. (ZHAO Yuzhen,CHEN Longyong,ZHANG Fubo. A new method of joint radar and communication waveform design and signal processing based on OFDM-chirp[J]. Journal of Radars, 2021,10(3):453-466.) doi:10.12000/JR21028.

[12] LI Mengjiao,WANG Wenqin,ZHENG Zhi . Communication-embedded OFDM chirp waveform for delay-Doppler radar[J]. The Institution of Engineering and Technology, 2018,12(3):353-360. doi:10.1049/iet-rsn.2017.0369.

[13] ZHANG YU. A modified waveform design for radar-communication integration based on LFM-CPM[C]// IEEE the 85th Vehicular Technology Conference. Sydney:IEEE, 2017:1-5. doi:10.1109/VTCSpring.2017.8108563.

[14] ZHANG Yu,LI Qingyu,HUANG Ling,et al. Waveform design for joint radar-communication system with multi-user based on MIMO radar[C]// 2017 IEEE Radar Conference(RadarConf). Seattle, WA, USA: IEEE, 2017: 415-418. doi: 10.1109/RADAR.2017.7944238.

[15] LI Qingyu, DAI Keren, ZHANG Yu, et al. Integrated waveform for a joint radar-communication system with high-speed transmission[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019,8(4):1208-1211. doi:10.1109/LWC.2019.2911948.

[16] BAI Wenlin,LI Peixuan,ZOU Xihua,et al. Millimeter-wave joint radar and communication system based on photonic frequency-multiplying constant envelope LFM-OFDM[J]. Optics Express, 2022,30(15):26407-26425. doi:10.1364/OE.461508.

[17] LYU Z,ZHANG Lu,ZHANG Hongqi,et al. Radar-centric photonic terahertz integrated sensing and communication system based on LFM-PSK waveform[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023,71(11):5019-5027. doi:10.1109/TMTT.2023.3267546.

[18] LI Jianguo,AN Sining,AN Jianping,et al. OFDM radar range accuracy enhancement using fractional Fourier transformation and phase analysis techniques[J]. IEEE Sensors Journal, 2020,20(2):1011-1018. doi:10.1109/JSEN.2019.2946003.

[19] BRAUN M,STURM C,JONDRAL F K. Maximum likelihood speed and distance estimation for OFDM radar[C]// 2010 IEEE Radar Conference. Arlington,VA,USA:IEEE, 2010:256-261. doi:10.1109/RADAR.2010.5494616.

[20] WANG Yuan,WEI Zhiqing,ZHOU Wei,et al. Triangular FM-OFDM waveform design for integrated sensing and communication[C]// 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops(ICC Workshops). Seoul,Korea:IEEE, 2022:515-519. doi:10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814639.

[21] IDREES N M,LU Zijie,SAQLAIN M,et al. Improvement in sensing accuracy of an OFDM-based W-band system[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2022,7(1):37-47. doi:10.23919/JCIN.2022.9745480.

[22] IDREES N M,LU Zijie,SAQLAIN M,et al. A W-band communication and sensing convergence system enabled by single OFDM waveform[J]. Micromachines, 2022,13(2):312. doi:10.3390/mi13020312.

[23] MAO Tianqi,CHEN Jiaxuan,WANG Qi,et al. Waveform design for joint sensing and communication in millimeter-wave and low terahertz bands[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022,70(10):7023-7039. doi:10.1109/TCOMM.2022.3196685.

[24] SCHWEIZER B,KNILL C,SCHINDLER D,et al. Stepped-carrier OFDM-radar processing scheme to retrieve high-resolution range-velocity profile at low sampling rate[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018,66(3):1610-1618. doi:10.1109/TMTT.2017.2751463.

[25] LI Oupeng,HE Jia,ZENG Kun,et al. Integrated sensing and communication in 6G:a prototype of high resolution THz sensing on portable device[C]// 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit. Porto,Portugal:IEEE, 2021:544-549. doi:10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482537.

[26] WANG Wenqin. MIMO SAR OFDM chirp waveform diversity design with random matrix modulation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015,53(3):1615-1625. doi:10.1109/TGRS.2014.2346478.

作者简介：

徐利民(1987-)，男，在读博士研究生，助理研究员，主要研究方向为太赫兹通信、毫米波雷达成像、太赫兹波谱分析与无损检测技术.email:xulimin@gdut.edu.cn.

付松年(1976-)，男，博士，教授，主要研究方向为光纤通信技术.

彭　迪(1988-)，女，博士，副教授，主要研究方向为微波光子技术在雷达和通信系统中的应用、光纤通信、光信号处理.

秦玉文(1960-)，男，博士，教授，主要研究方向为光纤传感、光纤通信、通感融合光子技术.