

文章编号: 2095-4980(2024)06-0671-08

## 基于 OFDM 的太赫兹通感一体化波形设计与性能分析

邓明康, 杨 闯\*, 石涵琛

(北京邮电大学 网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 针对当前正交频分复用(OFDM)通信系统, 开展了基于二维快速傅里叶变换(2D-FFT)的一体化波形研究。探究了太赫兹 OFDM 波形感知特性, 通过理论和仿真计算相结合, 分析不同频率和带宽下波形参数设计的影响, 以指导太赫兹 OFDM 通信感知一体化(ISAC)系统设计。理论和仿真计算分析表明, 太赫兹 OFDM 通信感知一体化系统具有多目标感知能力, 太赫兹大带宽特性使其感知距离分辨力高达厘米级, 速度分辨力可达分米每秒级, 且低感知信噪比情况下仍能解析出目标的位置与速度信息, 证明了 OFDM 通信感知一体化波形能够支撑太赫兹窄波束移动通信。

**关键词:** 太赫兹; 通信感知一体化; 正交频分复用; 二维快速傅里叶变换

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024105

## Design and performance analysis of terahertz integrated sensing and communication waveform based on OFDM

DENG Mingkang, YANG Chuang\*, SHI Hanchen

(National Key Laboratory of Network and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Focusing on current Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) communication systems, the integrated waveforms study is conducted based on two-Dimensional Fast Fourier Transform (2D-FFT). The sensing characteristics of THz OFDM waveforms are investigated by combining theoretical analysis with simulations to analyze the impacts of waveform parameter design under various frequencies and bandwidths, aiming to guide the design of THz OFDM Integrated Sensing And Communication(ISAC) systems. Theoretical and simulation analysis demonstrates that the THz OFDM integrated communication and sensing system possesses multi-object sensing capabilities, with the large bandwidth of THz enabling a high range resolution of the OFDM waveform sensing up to the centimeter level and a velocity resolution up to decimeter per second level. Moreover, even under low sensing Signal-to-Noise Ratio(SNR) conditions, the system can still resolve the position and velocity information of targets, confirming the capability of OFDM integrated communication and sensing waveforms to support THz narrow beam mobile communication.

**Keywords:** terahertz; integrated sensing and communication; Orthogonal Frequency Division Multiplexing; two-Dimensional Fast Fourier Transform

随着第五代移动通信系统(the fifth generation of mobile communication system, 5G)商业化的进程加快, 人类正迈向万物智联的第六代无线通信系统(6G)时代, 催生了众多新兴业务<sup>[1]</sup>。业务种类和业务量的增长本质上是对带宽需求的扩张, 具有丰富带宽资源的太赫兹频段(0.1~10 THz)成为学术界和工业界关注的焦点。2022年7月, IMT-2030(6G)推进组发布《6G典型场景和关键能力》, 确定通信感知一体化为6G潜在关键技术之一<sup>[2]</sup>。通信高

收稿日期: 2024-02-20; 修回日期: 2024-04-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2900200); 北京市自然科学基金资助项目(L223007); 北京邮电大学研究生创新创业资助项目(2024-YC-T003)

\*通信作者: 杨 闯 email:chuangyang@bupt.edu.cn

载波发展趋势和感知技术低载波发展趋势激发了两种系统在太赫兹频段的碰撞融合。太赫兹电磁波同时具备大带宽通信及高精度感知能力，与 6G 通感一体化的需求相匹配<sup>[3]</sup>。太赫兹通信技术已实现 100 Gbps 量级高速率通信，但随着应用场景的拓宽，如何在未来太赫兹移动通信系统中实现感知，破解移动性难题，成为当前亟待解决的关键问题。感知辅助通信被认为是潜在的解决方案之一<sup>[4]</sup>，因此，太赫兹通信感知一体化被认为是未来信息技术发展的重要方向<sup>[5]</sup>。太赫兹波频率高，波束窄，在移动场景下波束对准难<sup>[6]</sup>，现有研究方案多借助感知功能获取环境数据，估计通信目标位置，依靠改进天线的良好指向性<sup>[7]</sup>实现波束对准，提升无线通信链路稳定性<sup>[8]</sup>。

太赫兹通感一体化系统作为高速率通信、高分辨力感知系统，需重点关注信号的产生和处理方式。基于感知波形的一体化波形设计存在承载通信数据容量小等缺陷，与 6G 时代高通信速率需求不对应<sup>[9]</sup>，而基于通信的一体化波形中的 OFDM 波形在进行高速率通信的同时还能兼顾感知性能，是最有潜力的一体化波形之一<sup>[10]</sup>。现有的大部分基于 OFDM 波形进行一体化的波形设计并未充分考虑感知所需特性，使感知性能受到限制<sup>[11]</sup>，且通信和感知两者优化和设计的目标不同，在带宽有限的前提下，两者的性能(如信道容量以及参数估计性能等)存在此消彼长的制约关系<sup>[12]</sup>。因此，本文主要从理论和仿真中探究 OFDM 通感一体化波形的感知能力极值，分析感知能力的制约因素，为提升太赫兹系统的通感一体化性能提供参考。

## 1 太赫兹 OFDM 通感一体化系统框架及性能理论分析

### 1.1 太赫兹 OFDM 通感一体化系统框架

本文基于传统 OFDM 通信系统架构，通信和感知端共享同一发射器，通信接收机设置于通信目标上，感知接收机接收回波，与发射机位于同一设备或模块内。感知信号处理模块需通过发射端和感知回波接收端的数据协同处理，得到目标的距离和速度信息<sup>[13]</sup>，综合架构如图 1 所示。在基于 OFDM 通信系统的太赫兹通信感知一体化系统中，发射端首先生成二进制数据，通过 QAM 调制、离散傅里叶逆变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT)/快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)等生成基带信号，最后通过太赫兹射频前端<sup>[14]</sup>进行信号发射；通信接收端进行相应的信号解调，感知接收端去除通信信号后进行 2D-FFT 处理，解析出感知信息。

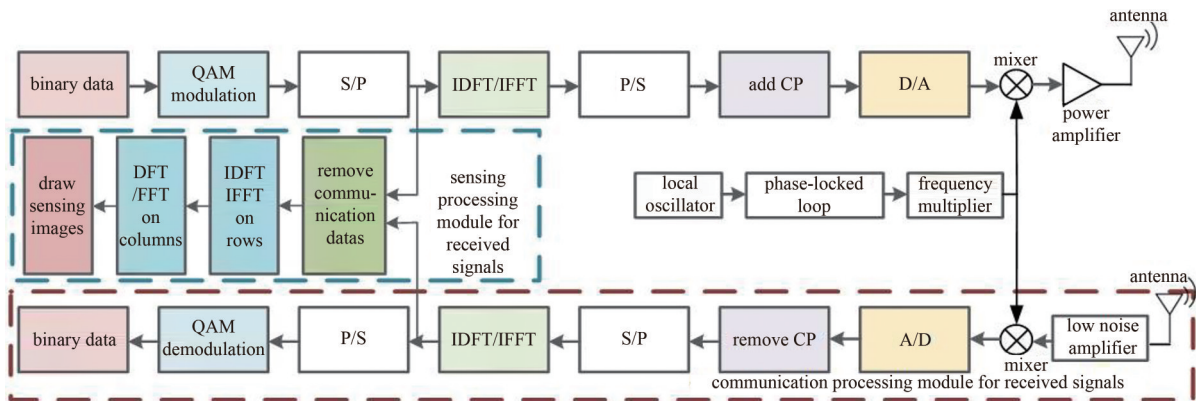


Fig.1 A framework for terahertz integrated sensing and communication system based on OFDM

图1 基于 OFDM 的太赫兹通感一体化系统框架

在去除接收信号感知处理模块后，其余模块构成传统 OFDM 通信系统架构，因此，此系统架构在未来实现通信感知一体化的系统设计过程中能基于 5G 空口技术实现<sup>[15]</sup>，为 6G 时代的太赫兹通信感知一体化技术提供参照。

### 1.2 太赫兹 OFDM 通感一体化波形设计及性能理论分析

本文采用基于 OFDM 信号的联合距离和多普勒估计算法，对接收到的信号进行去除通信数据、对距离和速度进行估计等操作，可得到距离和速度的二维感知图像。OFDM 信号可视为多个单载波在空间中的并行叠加，对于经过 IDFT(IFFT)后进行发射的数据，假设一时间帧内包含  $M$  个基础 OFDM 符号，其连续时间表达式  $x(t)$  可表示为<sup>[16]</sup>：

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} X_u[k] e^{i2\pi k \Delta f t} \text{rect} \left( \frac{t - uT_{\text{sym}}}{T_{\text{sym}}} \right) \quad (1)$$

式中： $N$  为子载波个数； $M$  为一帧内符号个数； $X_u[k]$  为发射信号第  $u$  个符号的第  $k$  个频域数据； $\Delta f$  为子载波间

隔； $T_{\text{sym}}$  为符号时间； $\text{rect}(x)$  为矩形窗函数。

若对一个距离为  $R$ 、径向相对速度为  $v$  的感知目标进行感知，将感知目标的距离影响和速度影响加入信号中。忽略  $\text{rect}(x)$  函数影响，回波信号的连续时间表达式  $y(t)$  为：

$$y(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{u=0}^{M-1} e^{j2\pi f_d t} \sum_{k=0}^{N-1} A_u[k] X_u[k] e^{-j2\pi k \Delta f t} e^{j2\pi k \Delta f t} \quad (2)$$

式中： $A_u[k]$  为电磁波在双向传播过程中产生的衰减及相移的复振幅因子；时延  $\tau = 2R/c$ ， $c$  为光速；多普勒频移  $f_d = 2v/\lambda = 2vf_c/c$ ， $\lambda$  为载波波长， $f_c$  为载波频率。

在感知接收端进行数字信号处理时为离散信号，根据采样时间与子载波间的关系  $T = 1/\Delta f$  与  $t/T = n/N$ ， $T$  为周期， $t$  为采样时间， $n$  为频域离散采样点。采样后得到的 OFDM 符号经过 DFT(FFT) 变换后得到的第  $u$  个 OFDM 符号频域表达式  $Y_u(k)$  为：

$$Y_u(k) = A_u[k] X_u[k] e^{-\frac{j2\pi k \tau}{T}} e^{j2\pi u f_d T_{\text{sym}}}; k=0, 1, \dots, N-1; u=0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{L} \mathbf{V}^T \quad (4)$$

式中： $\mathbf{L}$  为距离矢量， $\mathbf{L} = [1, e^{-\frac{j2\pi \tau}{T}}, e^{-\frac{j4\pi \tau}{T}}, \dots, e^{-\frac{j2\pi(N-1)\tau}{T}}]$ ； $\mathbf{V}$  为速度矢量， $\mathbf{V} = [1, e^{j2\pi f_d T_{\text{sym}}}, e^{j4\pi f_d T_{\text{sym}}}, \dots, e^{j2\pi(M-1)f_d T_{\text{sym}}}]$ ； $\mathbf{X}$  为通信发射数据矩阵； $\mathbf{Y}$  为接收数据矩阵； $\mathbf{L} \mathbf{V}^T$  为包含目标距离信息和速度信息的二维矩阵。将  $\mathbf{X}$  通过点除的方式去除后，可对其得到的二维矩阵的列向量进行 IDFT(IFFT)，行向量进行 DFT(FFT)：

$$\begin{cases} \text{range}(n) = \text{IDFT}(\mathbf{L}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-\frac{j2\pi k (2RN)}{Tc}} e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \\ \text{velocity}(m) = \text{DFT}(\mathbf{V}) = \sum_{u=0}^{M-1} e^{j2\pi u f_d T_{\text{sym}}} e^{-\frac{j2\pi um}{M}} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以得出，在  $n = 2RN/Tc$ 、 $m = f_d M T_{\text{sym}}$  时，两指数相消，将在距离序列  $\text{range}(n)$ 、速度序列  $\text{velocity}(m)$  中出现峰值，由此得到感知图像，从而估计出探测目标的距离信息和速度信息。

太赫兹 OFDM 通信感知一体化的通信性能分析与传统 OFDM 通信系统的性能分析相同，误码率(Bit Error Rate, BER)是评估通信系统性能最核心的指标之一，瑞利信道条件下， $M$  阶 QAM 信号的误码率理论上为：

$$R_{\text{BE}} \approx \frac{c_1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{c_2^2 E_b / N_0}{2 + c_2^2 E_b / N_0}} \right) \quad (6)$$

式中： $E_b$  为接收信号每比特的平均能量； $N_0$  为噪声功率谱密度； $c_1 = 2(\sqrt{M} - 1)/(\sqrt{M} \log_2 \sqrt{M})$ ， $c_2 = \sqrt{3 \log_2 \frac{M}{M-1}}$ 。

本文重点关注太赫兹 OFDM 通感一体化的感知性能。由于太赫兹频段的电磁波在传播过程中损耗较高，且目标的反射及散射回波损耗也较高<sup>[17]</sup>，因此主要关注式(4)中的矢量  $\mathbf{A}$  中的衰减因子对感知性能造成的影响。若感知回波信号的信噪比较低，可能会影响感知性能的极值表现。实际应用场景中，最大感知距离受波形设计参数、电磁波损耗以及环境特性的共同影响。因此，最大感知距离与最大感知速度需从3个方面考虑：a) 算法处理限制。最大感知距离与速度在信号处理过程中有范围限制，即  $n = 2RN\Delta f/c \leq N$  与  $m = f_d M T_{\text{sym}} \leq M$ ；b) 波形设计限制。对于感知距离，要防止符号间干扰，传播时延需小于 OFDM 符号中设定的循环前缀(Cyclic Prefix, CP)长度，即  $2R/c \leq T_{\text{CP}}$ ；对于感知速度，需考虑通信性能对多普勒频移的限制，为保持较高的通信性能，通信端多普勒频移不超过子载波间隔的 1/10，而感知回波由于双向传输，产生的频移为通信端频移的 2 倍，即  $f_{d,\text{max}} = \Delta f/5$ ；c) 传输损耗。受距离、载波频率等影响，若接收信号的信噪比过低，会导致无法解析出目标距离与速度信息<sup>[18]</sup>。对于感知图像，最低信噪比  $R_{\text{SN},\text{min}}$  须达到一定阈值才能解析出感知信息。

综上，最大感知距离  $R_{\text{max}}$  与最大感知速度  $v_{\text{max}}$  满足：

$$R_{\text{max}} = \min \left\{ \frac{c}{2\Delta f}, \frac{T_{\text{CP}} c}{2}, 4 \sqrt{\frac{P_{\text{Tx}} G_{\text{Tx}} G_{\text{Rx}} G_{\text{Sen}} \sigma_{\text{RCS}} \lambda^2}{(4\pi)^3 R_{\text{SN},\text{min}} P_{\text{N}} N F}} \right\} \quad (7)$$

$$v_{\text{max}} = \min \left\{ \frac{\Delta f c}{10 f_c}, \frac{\lambda}{4 T_{\text{sym}}} \right\} \quad (8)$$

式中： $P_{\text{Tx}}$  为发射信号功率； $G_{\text{Tx}}$  和  $G_{\text{Rx}}$  为发射天线增益和接收天线增益； $\sigma_{\text{RCS}}$  为反射物体的感知雷达横截面； $\lambda$  为



波长； $P_N$  为噪声功率； $NF$  为噪声系数； $G_{\text{Sen}}$  为感知处理增益。

由于太赫兹频段的宽带特性，在波形设计中可以采用更大的子载波带宽与更多的子载波数量，但也导致符号时长更短。因此，在给定的时间内，发射信号能够容纳更多的子载波和 OFDM 符号，增大了算法的处理增益，弥补了太赫兹通信中的传播损耗较大等缺陷。具体而言，太赫兹频段通信感知一体化 OFDM 系统与太赫兹信道特性相契合，能够在低信噪比下提取目标的感知信息，促进太赫兹环境下感知辅助通信的发展<sup>[19]</sup>。感知处理增益满足： $G_{\text{Sen}}=10\lg NM$ ，但对感知性能的深入分析并非仅限于考虑感知信噪比，还必须综合考虑在大带宽条件下进行波形设计时，不同感知性能之间相互制约的关系，以及感知图像的分辨力。由于 2D-FFT 算法在感知过程中存在对距离和速度的范围限制，随着子载波带宽的增大，在载波频率不变的情况下，相应缩短了符号时间，导致最大感知距离减小，最大感知速度增大。这种制约关系可见图 2。

相对于 5G，6G 的带宽和载波频率都显著增加，对感知分辨力也会产生影响。距离分辨力和速度分辨力主要指感知图像中同一方向上的 2 个大小相等的物体之间最小可区分的距离或速度<sup>[20]</sup>。在进行感知分辨力分析之前，首先需在距离或速度感知图像中观察到明显的峰值。因此感知分辨力与感知图像的信噪比密切相关，感知图像的信噪比受路径损耗和多径效应等因素的影响。在考虑影响最大感知距离的因素时，已综合考虑了自由空间路径损耗、噪声功率以及噪声系数等因素。因此，分析分辨力的前提是感知目标处于最大感知距离和最大感知速度范围内。多径效应在不同频段下呈现不同的特征，如太赫兹频段的信道呈现出稀疏性，多径效应相对较弱。本文着重关注该算法在不同频段下解析感知目标的能力，因此主要关注影响信噪比的主要因素，即路径损耗等。距离分辨力和速度分辨力对应距离处理/匹配滤波后的  $N$  点结果和无模糊多普勒频率处理的符号估计数  $M$  后，得到感知距离分辨力和感知速度分辨力为：

$$\begin{cases} \Delta R = \frac{c}{2N\Delta f} = \frac{c}{2B} \\ \Delta v = \frac{\lambda}{2MT_{\text{sym}}} = \frac{c}{2f_c T_{\text{frame}}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $T_{\text{frame}}$  为一帧内所有 OFDM 符号的累积时间； $B$  为带宽。

通过以上公式，可推导出带宽和载波频率分别与感知图像的距离分辨力和速度分辨力成反比。因此，理论上太赫兹频段下的大带宽和高载波频率，可使感知图像具有极高的感知分辨力，这与 6G 典型应用场景中对高分辨力的需求相一致<sup>[2]</sup>。多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统能从空间域上解析感知目标的角度信息。传统 MIMO-OFDM 系统复用方法有 3 种主要类型：时分复用、频分复用及码分复用，不同类型的复用方法会影响系统感知性能之间的权衡。评估角度估计性能的一个重要参数为克拉美罗界(Cramér-Rao Bound, CRB)，在估计误差方差方面具有无偏估计器的最佳性能。在 MIMO 感知系统中，针对角度估计的 CRB 可表述为<sup>[21]</sup>：

$$B_{\text{CR}} \geq \frac{6c^2}{\pi^2 f_c^2 \lambda^2 \cos^2 \theta (N_{\text{ant}}^2 - 1)(N_{\text{ant}} NM) R_{\text{SN,RX}} P_{\text{TX}}} \quad (10)$$

式中： $\theta$  为感知目标的角度信息； $N_{\text{ant}}$  为发射与接收天线规模； $R_{\text{SN,RX}}$  为针对感知目标的接收功率信噪比； $P_{\text{TX}}$  为射向目标角度的平均发射功率。

与克拉美罗界相关的评估感知性能的另一参数为感知速率  $R_{\text{sen}}$ ，其表达式与香农容量公式相似，且与通信速率高度对称<sup>[22]</sup>，若感知目标的运动变化率表示为  $\sigma_m^2$ ，则感知速率表达式为：

$$R_{\text{sen}} \leq \frac{1}{2T_{\text{sym}}} \log 2 \left( 1 + \frac{\sigma_m^2}{B_{\text{CR}}} \right) \quad (11)$$

## 2 太赫兹 OFDM 波形感知性能分析

本节基于单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)系统条件下的太赫兹 OFDM 通感一体化系统框架，对处理增益、最大感知距离及最大感知速度、距离分辨力和速度分辨力进行探讨，将太赫兹频段与其他频段的感知性能进行对比，分析太赫兹频段特性所对应的感知性能特点。

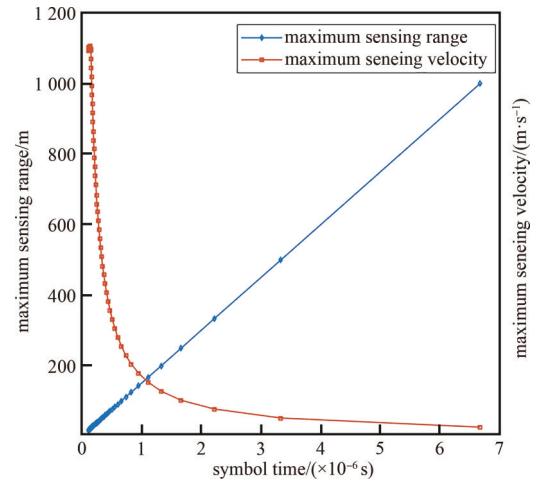


Fig.2 Relationship between maximum sensing range/speed and symbol time

图 2 最大感知距离/速度与符号时间之间的关系

为贴合实际应用要求，当载波频率较低时，载波频率参考现 4G、5G 等标准进行设置；当载波频率升高到毫米波时，载波频率按照现常用毫米波雷达频率的 77 GHz、94 GHz 进行设置<sup>[23]</sup>；到亚太赫兹/太赫兹频段时，载波频率依次按照 94 GHz、140 GHz、220 GHz、340 GHz 进行设置<sup>[24]</sup>。考虑到符号时间会影响感知性能中的最大感知距离和感知速度，以及通信性能中的通信速率，为分析载波频率升高与带宽增大在感知性能方面产生的影响，在考虑了感知因素后，进行不同频段下的波形参数设计，并进行性能对比。由于现阶段高频通信波形的设计标准仍处于探索阶段，随着载波频率增大，其他参数的设置参考现阶段低频、毫米波以及太赫兹波对应的通信系统或雷达系统频率带宽等参数设置<sup>[25]</sup>，使其与对应频段的带宽特性相吻合。电磁波传输在距离一定的情况下，路径损耗会随着载波频率的增大而减小。为使信噪比更符合实际，进行仿真实验时加入式(8)中的路径损耗、感知雷达横截面、噪声系数等影响；为凸显波形设计和频段特性等因素对感知性能的影响，在保持 CP 长度比例、噪声系数、单位带宽噪声功率、发射与接收天线增益等参数一致的条件下，系统采用 16QAM 调制方案。这样的设计确保了在各个条件下的信号特征保持一致，对不同参数的性能比较更为准确可靠。通过这样的实验设计，能够全面了解不同参数对通信感知性能极值的情况，为进一步优化系统性能提供有力的参考依据。具体的参数设置如表 1 所示。

表 1 载波频率及相对应的波形参数设置

Table 1 Settings of carrier frequency and corresponding waveform parameters

parameters	value										
carrier frequency/GHz	2.4	3.5	5.8	12.0	28.0	39.0	77.0	94.0	140.0	220.0	340.0
bandwidth/MHz	16	50	90	400	1 250	1 600	1 800	2 000	2 500	6 000	8 000
subcarrier frequency/kHz	31.25	48.83	87.89	195.31	305.16	390.63	439.45	488.28	610.35	732.42	976.56
$N$	512	1 024	1 024	2 048	4 096	4 096	4 096	4 096	4 096	8 192	8 192
$M$	32	64	64	128	256	256	512	512	1 024	1 024	2 048
CP percentage/%	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
processing gain/dB	42.144	48.165	48.165	54.185	60.206	60.206	63.216	63.216	66.227	69.237	72.247

2.1 不同频段下的感知图像信噪比

感知图像的信噪比与接收信号的信噪比有所不同。一般而言，感知图像中的信噪比会高于接收信号的信噪比，这是因为感知图像的形成是通过接收频域信号经过一次 IFFT 和一次 FFT 处理得到，处理过程中会引入相应的处理增益，表 1 中进行了不同  $N$  点和  $M$  点数值对应的感知图像处理增益的计算。为分析大带宽带来的高处理增益对感知图像的影响，按照表 1 中的参数设置对同一目标进行感知仿真。通过对载波频率、带宽、子载波个数和符号个数的变化与仿真结果进行观察，可以得出感知图像信噪比随着这些参数的增大而变化的趋势。

图 3 为不同的载波频率和带宽条件下，接收信号信噪比和距离感知图像信噪比的情况。对于相同目标的感知，毫米波频段的接收信号信噪比降至 0 dB 以下，在亚太赫兹/太赫兹频段则降至 -10 dB 以下。但随着频段的提高和带宽的增加，算法的处理增益得到了显著提升，亚太赫兹/太赫兹频段的感知图像信噪比超过 10 dB。表明太赫兹频段的通信感知一体化 OFDM 系统在接收信号信噪比低于 0 dB 的条件下，仍具备解析目标感知信息的能力。此系统能有效对抗由高频段引起的高路径损耗问题。

2.2 太赫兹频段下传统 OFDM 通信性能与感知协同下的 OFDM 通信性能对比

传统 OFDM 系统要求子载波间维持正交性，因此对多普勒频移显得尤为敏感。为深入探讨感知协同技术在 OFDM 通信中的潜在优势，本文对比了太赫兹频段下传统 OFDM 与感知协同下 OFDM 的通信性能。感知协同机制允许在 OFDM 信号发射端获取

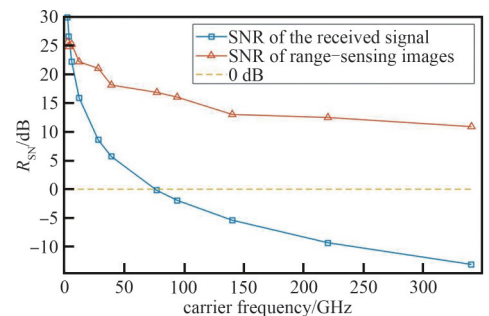


Fig. 3 Comparison of SNR of the received signal and range-sensing image under different conditions

图 3 不同载波频率不同带宽条件下接收信号信噪比及距离感知图像信噪比对比

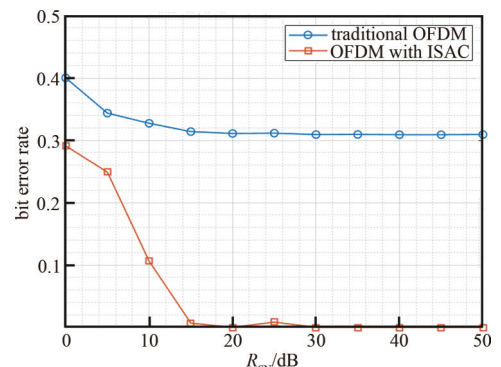


Fig. 4 Comparison of bit error rates between traditional OFDM and OFDM with ISAC in the terahertz frequency band with the presence of Doppler shift

图 4 多普勒频移存在时太赫兹频段传统 OFDM 误码率与感知协同 OFDM 的误码率对比

目标的多普勒信息，从而在波形发射前对多普勒效应进行有效补偿。在进行通信性能仿真时，本文采用表 1 中提供的 140 GHz 对应的参数条件，模拟不同接收信噪比条件下，具有相同、相对速度的目标进行通信的场景，并对比其误码率，结果如图 4 所示。当接收信噪比较高时，传统 OFDM 系统由于多普勒效应的影响，误码率相对较高；与之相反，感知协同下的 OFDM 系统展现出了较好的误码率性能。这不仅凸显了其对于多普勒效应的有效适应能力，而且突显了其相较于传统 OFDM 系统在适应各种通信场景中所具有的明显优势。

### 2.3 不同频段下感知性能对比

为分析波形设计中大带宽对感知极值的影响，进行最大感知距离和最大感知速度仿真时，依据表 1 的参数设置：针对单个动态目标进行感知仿真，调整目标的距离和相对速度，直至感知图像中的信噪比达到一定阈值或达到感知图像的最大值为止；进行感知距离分辨力和感知速度分辨力仿真时，对双动态目标在其最大感知距离和最大感知速度范围内进行感知仿真，调整双目标之间的距离与相对速度，直至距离或速度感知图像中的双峰值通过 3 dB 带宽无法进行分辨。

图 5 为不同载波频率、不同带宽条件下，最大感知距离和速度对比曲线图。最大感知距离在载波频率达到 100 GHz 时下降到 150 m 左右，在 340 GHz 时下降到 100 m 左右，因此太赫兹波适合于中短距离的探测。最大感知速度受载波频率和子载波间隔影响，且相互之间存在一定的制约关系，在表 1 设置的载波频率和子载波间隔逐渐增大的条件下，最大探测速度在太赫兹频段达 350 m/s 以上，能满足实际应用需求。

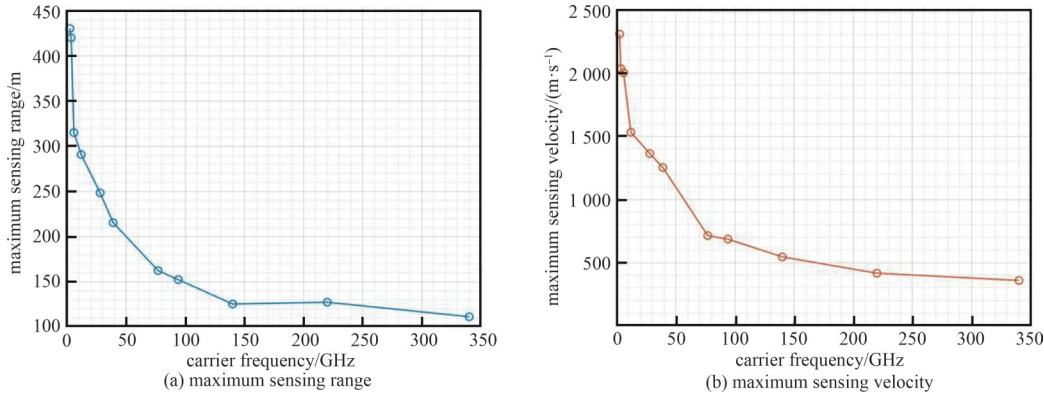


Fig.5 Comparison of maximum sensing range and velocity under different carrier frequencies and bandwidth conditions  
图 5 不同载波频率不同带宽条件下最大感知距离和速度对比

图 6 为不同载波频率、不同带宽条件下感知分辨力对比曲线图。感知距离分辨力与感知速度分辨力随着载波频率以及带宽增大有较显著的提高。在载波频率为 12 GHz、带宽为 400 MHz 时，距离分辨力和速度分辨力为 0.75 m 和 31.77 m/s；在载波频率为 340 GHz、带宽为 8 000 MHz 时，距离分辨力为 0.037 m，速度分辨力达到 0.35 m/s。这表明太赫兹频段的超大带宽能够显著提高感知性能的精确度和分辨力，更好地满足 6G 时代对感知的需求。

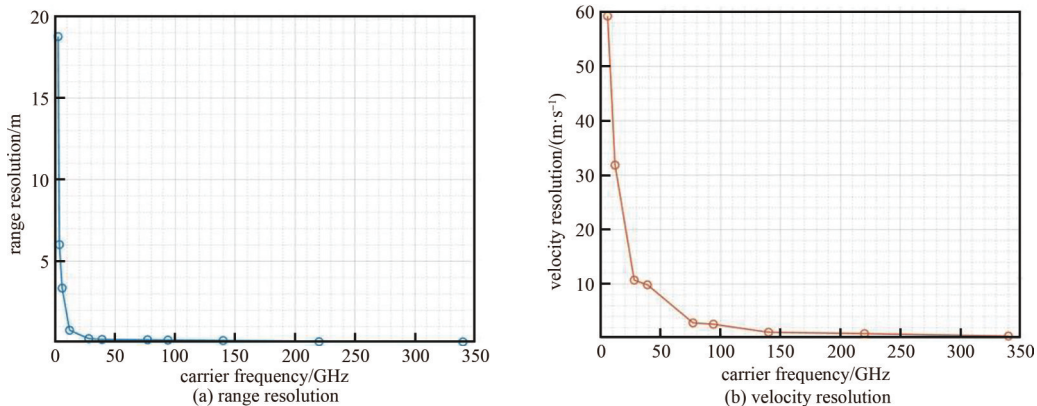


Fig.6 Comparison of sensing resolution under different carrier frequencies and bandwidth conditions  
图 6 不同载波频率不同带宽条件下感知分辨力对比

为对比表 1 中不同载波频率、不同带宽条件下，太赫兹 MIMO-OFDM 通感一体化系统角度估计的感知性能，



设 MIMO-OFDM 通感一体化系统发射与接收天线规模、接收信噪比等参数一致，而载波频率、子载波个数等参数按照表 1 进行设置，对具有相同目标角度与运动变化率的目标进行感知仿真。

图 7 为不同载波频率、不同带宽条件下的角度估计 CRB 与感知速率对比曲线图。随着载波频率、子载波间隔、子载波个数和一帧内符号个数的增大，MIMO-OFDM 系统角度估计的 CRB 减小，角度感知速率增大。说明高频段的大带宽使系统的角度估计误差更小，即感知精确度更高，且感知速率也大幅提高，与 6G 时代对感知的需求相对应。

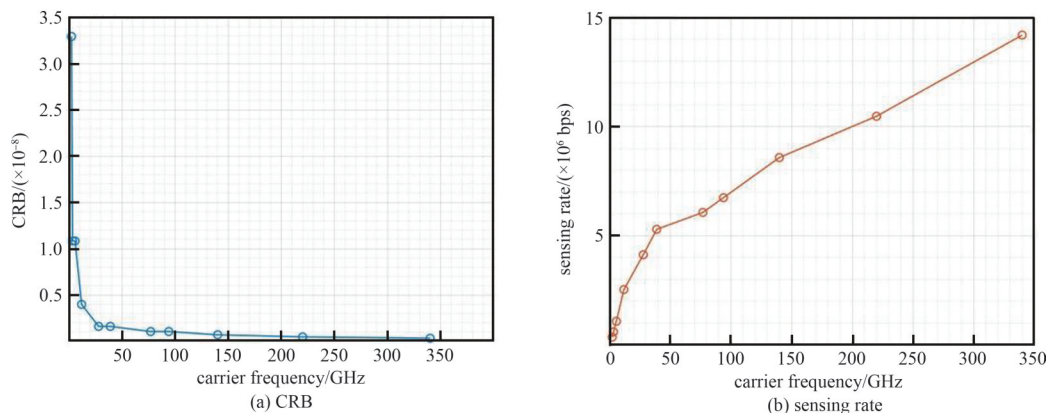


Fig.7 Comparison of CRB and sensing rate of angle estimation under different conditions

图 7 不同载波频率不同带宽条件下的角度估计 CRB 与感知速率对比

### 3 结论

本文对太赫兹频段的 OFDM 通信感知一体化系统框架、波形设计以及感知极值和分辨力进行了理论和仿真分析。通过在不同频段和带宽条件下进行综合考量，深入探讨了影响 OFDM 系统感知性能的因素，着重分析了太赫兹频段在高频率载波和大带宽条件下进行感知的优势。太赫兹频段下的 OFDM 通感一体化系统在最大感知距离方面受限，因此特别适用于中短距离的探测。随着太赫兹硬件器件的不断小型化，未来若配合超密集基站的部署，并利用太赫兹波的波束对准等技术，有望实现感知辅助通信的功能。此外，太赫兹频段的大带宽使得其感知分辨力远高于当前 5G 技术水平，更符合未来 6G 时代对高精度度、高分辨力感知的需求。此外，太赫兹频段大带宽所对应的高 FFT 点数为感知图像处理提供了较高的增益，能弥补太赫兹波传输中的较大损耗，进一步推动太赫兹感知辅助通信技术的发展和應用。

#### 参考文献：

- [1] 王健,杨闯,闫宁宁. 面向 B5G 和 6G 通信的数字孪生信道研究[J]. 电波科学学报, 2021,36(3):340-348,385. (WANG Jian, YANG Chuang, YAN Ningning. Study on digital twin channel for the B5G and 6G communication[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021,36(3):340-348,385.) doi:10.12265/j.ejors.2020240.
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G 典型场景和关键能力[R/OL]. (2022-08-01). [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz).
- [3] 尉志青,冯志勇,李怡恒,等. 太赫兹通信感知一体化波形:现状与展望[J]. 通信学报, 2022,43(1):1-10. (WEI Zhiqing, FENG Zhiyong, LI Yiheng, et al. Terahertz joint communication and sensing waveform: status and prospect[J]. Journal on Communications, 2022,43(1):1-10.) doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2022007.
- [4] Inmarsat Global Ltd. Preliminary draft new report ITU-R M. [SAT-IMT2020. VISION & REQUIREMENTS] -Vision and requirements for satellite radio interface(s) of IMT-2020[R/OL]. (2022-09-05). <https://www.itu.int/md/R19-WP4B-C-0127>.
- [5] 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 integrated communication and sensing[J]. Journal of Communications, 2022,43(2):76-88.)
- [6] HUQ K M S, BUSARI S A, RODRIGUEZ J, et al. Terahertz-enabled wireless system for beyond-5G ultra-fast networks: a brief survey[J]. IEEE Network, 2019,33(4):89-95. doi:10.1109/MNET.2019.1800430.
- [7] DHARMARATHNA B A M P C, MADUSANKA H D T S, KARUNARATHNA M A A. PCB base log-periodic antenna for mobile communications[J]. Instrumentation, 2021,8(3):46-51. doi:10.15878/j.cnki.instrumentation.2021.03.003
- [8] 范玉衡,杨闯,彭木根. 感知协同太赫兹多天线移动通信:原理、现状与展望[J]. 移动通信, 2023,47(3):84-91. (FAN Yuheng,

- YANG Chuang,PENG Mugen. Sensing-aided terahertz MIMO mobile communication: principle, status and prospect[J]. *Mobile Communications*, 2023,47(3):84-91. doi:10.3969/j.issn.1006-1010.20230302-0003.
- [9] NIE Haijiang,ZHANG Fangzheng,YANG Yue,et al. Photonics-based integrated communication and radar system[C]// 2019 International Topical Meeting on Microwave Photonics(MWP). Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2019:1-4. doi:10.1109/MWP.2019.8892218.
- [10] 张若愚,袁伟杰,崔原豪,等. 面向 6G 的大规模 MIMO 通信感知一体化:现状与展望[J]. *移动通信*, 2022,46(6):17-23. (ZHANG Ruoyu,YUAN Weijie,CUI Yuanhao,et al. Integrated sensing and communications with massive MIMO for 6G:status and prospect[J]. *Mobile Communications*, 2022,46(6):17-23.) doi:10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.003.
- [11] 姜大洁,姚健,李健之,等. 通信感知一体化关键技术与挑战[J]. *移动通信*, 2022,46(5):69-77. (JIANG Dajie,YAO Jian,LI Jianzhi,et al. Key technologies and challenges for integrated sensing and communication[J]. *Mobile Communications*, 2022,46(5):69-77.) doi:10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.011.
- [12] YUAN Xin,FENG Zhiyong,ZHANG J A,et al. Spatio-temporal power optimization for MIMO joint communication and radio sensing systems with training overhead[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021,70(1):514-528.
- [13] 黄驿轩. 通信雷达一体化波形设计及信号处理[D]. 成都:电子科技大学, 2022. (HUANG Yixuan. Integrated waveform design and signal processing for communication radar[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology, 2022.)
- [14] 石涵琛,杨闯,彭木根. 6G 太赫兹通信:架构、技术与挑战[J/OL]. *电波科学学报*, 2023-11-20. (SHI Hanchen,YANG Chuang,PENG Mugen. 6G terahertz communication:architecture,technology and challenges[J/OL]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2023-11-20.)
- [15] UYSAL F. Phase-coded FMCW automotive radar:system design and interference mitigation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020,69(1):270-281. doi:10.1109/TVT.2019.2953305.
- [16] 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.
- [17] CHACCOUR C,SOORKI M N,SAAD W,et al. Seven defining features of terahertz(THz) wireless systems: a fellowship of communication and sensing[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022,24(2):967-993.
- [18] STURM C,ZWICK T,WIESBECK W,et al. Performance verification of symbol-based OFDM radar processing[C]// 2010 IEEE Radar Conference. Arlington,VA,USA:IEEE, 2010:60-63. doi:10.1109/RADAR.2010.5494651.
- [19] 胡田钰,李玲香,陈智. 多频段协同通信的新机遇——太赫兹通信感知一体化[J]. *中兴通讯技术*, 2022,28(4):14-18. (HU Tianyu,LI Lingxiang,CHEN Zhi. New opportunities for multi-band collaborative communication—integrated communications and sensing at terahertz band[J]. *ZTE Technology Journal*, 2022,28(4):14-18.) doi:10.12142/ZTETJ.202204004.
- [20] KUMBUL U,PETROV N,VAUCHER C S,et al. Sensing performance of different codes for phase-coded FMCW radars[C]// 2022 the 19th European Radar Conference(EuRAD). Milan,Italy:IEEE, 2022:1-4. doi:10.23919/EuRAD54643.2022.9924751.
- [21] OZKAPTAN C D,ZHU Haocheng,EKICI E,et al. A mmWave MIMO joint radar-communication testbed with radar-assisted precoding[J/OL]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023. doi:10.1109/TWC.2023.3337282.
- [22] 杨闯,刘子乐,石涵琛,等. 太赫兹多天线移动通信性能界理论[J]. *无线电通信技术*, 2023,49(6):987-996. (YANG Chuang,LIU Zile,SHI Hanchen,et al. Theory of performance bounds of terahertz MIMO mobile communications[J]. *Radio Communications Technology*, 2023,49(6):987-996.) doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2023.06.001.
- [23] VENON A,DUPUIS Y,VASSEUR P,et al. Millimeter wave FMCW RADARs for perception, recognition and localization in automotive applications: a survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022,7(3):533-555. doi:10.1109/TIV.2022.3167733.
- [24] JAMSHED M A,NAUMAN A,ABBASI M A B,et al. Antenna selection and designing for THz applications: suitability and performance evaluation:a survey[J]. *IEEE Access*, 2020(8):113246-113261. doi:10.1109/ACCESS.2020.3002989.
- [25] ZAIDI A A,BALDEMAIR R,MOLES-CASES V,et al. OFDM numerology design for 5G new radio to support IoT,eMBB,and MBSFN[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018,2(2):78-83. doi:10.1109/MCOMSTD.2018.1700021.

#### 作者简介:

邓明康(2001-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹通信感知一体化。email:dengmingkang@bupt.edu.cn.

杨闯(1992-),男,博士,特聘副研究员,博士生导师,主要研究方向为 6G 太赫兹通信感知一体化。

石涵琛(2000-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹无线通信、6G 太赫兹通信感知一体化。