

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107367

# 室内环境 OFDM 与 UWB 通信定位 一体化系统兼容性分析

崔宋祚 蔚保国 鲍亚川

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室 石家庄 050081)

**摘要:** 随着 5G、WiFi 通信技术的不断发展以及超宽带信号(UWB)高精度定位系统的广泛应用,在室内空间下正交频分复用信号(OFDM)与 UWB 信号的共存互干扰不可忽视。采用等效载噪比的分析方法,结合两者物理特性,使用 MATLAB 搭建两系统物理层模型,根据谱分离系数来计算干扰信号随接收信号进入接收机而引起的噪声量,进而通过受干扰情况下接收机的等效信噪比获得 OFDM 通信系统的误码率和 UWB 系统的定位精度。仿真结果表明,OFDM 信号与 UWB 信号间存在同频信号干扰,干扰中心处 UWB 信号定位误差放大 12 倍以上,OFDM 通信信号误码率上升至  $10^{-3}$  左右,即信号同频互干扰会造成 5G、WiFi 等通信系统性能下降的同时严重影响 UWB 系统的定位精度。通过提出基于分布式低功率微基站的系统部署优化方案,实现了实验区域内通信性能几乎不变情况下定位性能的显著提高,整个实验区域均可保证分米级的定位精度。研究结果可为 5G 通信系统与 UWB 定位系统的一体化设计与设备部署提供参考。

**关键词:** 信号兼容性;等效载噪比;误码率;定位精度

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Analysis of mutual interference between OFDM communication system and UWB positioning system in indoor environment

Cui Songzuo Yu Baoguo Bao Yachuan

(State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** With the development of 5G, WiFi communication technology and the wide application of ultra wideband (UWB) high precision positioning system, the mutual interference between orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal and UWB signal cannot be ignored in indoor space. The analysis method of system equivalent carrier to noise ratio is adopted, combined with the physical characteristics of the two systems, and the physical layer model of the two systems is built by MATLAB. According to the spectral separation coefficient, the amount of noise caused by the interference signal entering the receiver is calculated, and then the BER of OFDM communication system and the positioning accuracy of UWB system are obtained by the equivalent signal to noise ratio of the receiver in the case of interference. Simulation results show that there is signal interference between OFDM signal and UWB signal. The positioning error of UWB signal at the interference center is amplified by more than 12 times, and the bit error rate of OFDM communication signal rises to about  $10^{-3}$ . In other words, the same frequency mutual interference of signals will degrade the performance of 5G, WiFi and other communication systems and seriously affect the positioning accuracy of UWB system. Through the proposed system deployment optimization scheme based on distributed low-power micro-base station, the positioning performance is significantly improved in the case of almost constant communication performance in the experimental area, and the decimeter positioning accuracy can be guaranteed in the whole experimental area. The research results can provide reference for the integrated design and equipment deployment of 5G communication system and UWB positioning system.

**Keywords:** signal compatibility; equivalent carrier to noise ratio; bit error rate; positioning accuracy

### 0 引言

超宽带(ultra wide band, UWB)脉冲通信由于其优良、

独特的技术特性,在无线多媒体通信、雷达、穿墙透地探测、成像和测量等领域获得日益广泛的应用,也是室内定位的热点研究领域之一<sup>[1]</sup>。正交频分复用(orthogonal

收稿日期:2021-07-23

frequency division multiplexing, OFDM) 由于其频率利用率最高,又适用于 FFT 算法处理,近年来在多种系统得到成功的应用,在理论和技术上已经成熟。因此,3GPP/3GPP2 成员多数推荐 OFDM 作为第 4 代移动通信无线接入技术之一。目前,OFDM 技术在 4G LTE 技术中已得到使用,是 LTE 三大关键技术之一,并在 5G 中仍然作为主要的调制方式。

UWB 无线通信技术虽然开拓了新的频谱资源,但它需要占用极宽的带宽,可能会与共享频带内的其他系统形成干扰<sup>[2]</sup>。UWB 系统在无授权机制下允许的通信范围为 3.1~10.6 GHz,而根据 3GPP 的最新标准,对 5G FR1 的频率范围为 450~6 000 MHz,两者会不可避免的产生频谱重叠。因此随着 5G 通信技术的发展普及与 UWB 室内高精度定位技术的广泛应用,在近距离且频谱资源共享的情况下,OFDM 无线通信系统对 UWB 定位系统的干扰影响不可忽视。

针对不同信号间兼容性的分析方法,国内外学者做了大量研究,主要分析方法包括链路预算法与物理层模型仿真法两种。其中链路预算法<sup>[3]</sup>通过计算链路损耗获取干噪比,从而对超宽带与蜂窝移动通信系统共存时干扰信号的发射功率门限值进行规定。这种计算方法直观简捷却没有考虑物理结构、信号特性,其结果不够严格;基于物理层仿真的分析方法通过搭建物理层仿真模型<sup>[4]</sup>,提取 LTE 与超宽带系统对应工作频带内的信号能量进行相加,对受扰信号误码率进行分析得到干扰信号最大发射功率。这种模型仿真方法充分利用了系统物理层特性却较为复杂,仿真运行时间久<sup>[5]</sup>。此外,现有 UWB 与 OFDM 兼容性研究成果只对两系统共存时的接收端误码率进行了分析,未对信号干扰对定位精度的影响做出合理解释。

本文搭建 UWB 与 OFDM 系统物理层模型<sup>[6]</sup>,提出通过获取各信号的归一化功率谱密度,再利用频谱叠加后等效信噪比的方式对两者的干扰进行了计算,并将信号互干扰在实际应用场景下与误码率、定位精度等系统性能指标的耦合关系进行仿真分析。仿真结果将实现对信号互干扰造成通信与定位性能受损程度的量化估计,并在不改变信号体制的基础上通过设计新型基站部署方式,实现信号互干扰环境下系统定位性能的提高。

## 1 系统模型

### 1.1 UWB 物理层模型

现有 UWB 系统的技术体制分为脉冲无线电超宽带(IR-UWB)和多带超宽带(MB-UWB)两类<sup>[7]</sup>。本文参考 802.15.4a 协议,搭建 500 MHz 工作带宽的跳时脉冲位置调制信号(TH-PPM UWB)物理层模型。

本文使用的跳时(TH)超宽带信号作为目标的发射信号以实现多址技术,TH 序列采用伪随机序列,用脉冲位置调制(PPM)技术实现信号调制。对于发射机而言

TH-PPM UWB 信号可以表示为:

$$s(t) = \sum_{j=0}^{N_f-1} \tau \omega(t - jT_f - c_j^{(k)}T_c - \delta p_j) \quad (1)$$

TH-PPM 调制示意如图 1 所示。

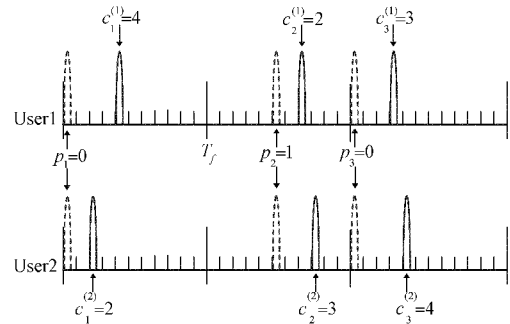


图 1 TH-PPM UWB 调制图

解调部分的具体方法步骤如图 2 所示。

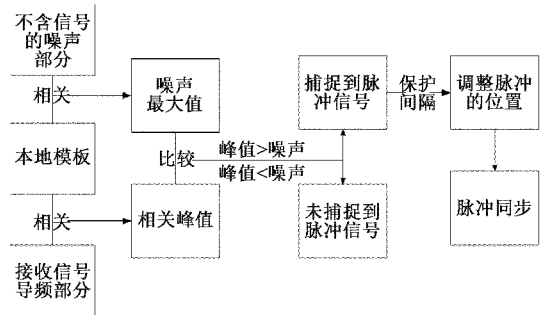


图 2 TH-PPM UWB 解调图

接收机首先完成同步,随后采用相关检测的接收模式进行数据接收,互相关函数的峰值处即为捕获到的脉冲信号的位置,由此完成信号的到达时间估计与节点间测距。

### 1.2 OFDM 物理层模型

作为 4G 与 5G 信号体制设计的关键技术之一,一个完整的 OFDM 通信系统<sup>[8]</sup>包括 3 个部分:发射模块、信道模块和接收模块。主要由信号源、编码(解码)、交织(解交织)、成帧、信道估计和均衡构成<sup>[9]</sup>。由于 5G 协议仍在完善中,本文参考 IEEE 802.11n 协议搭建了工作带宽为 20 MHz 的物理层模型。

OFDM 发送端将被传输的数字数据转换为子载波幅度和相位的映射<sup>[10]</sup>,并进行 IDFT 变换将数据的频谱表达式变到时域上。接收端进行发送端相反的操作,将去掉保护间隔的 OFDM 符号进行串并转换,用 FFT 变换分解频域信号,子载波的幅度和相位被采集出来并转换为数字信号。如图 3 所示为 OFDM 物理层模型图。

## 2 互干扰分析方法

将期望信号记为  $S_x(t)$ ,其功率值为  $C$ ,功率谱密度为  $S_x(f)$ ,定义信号在无限带宽上的归一化功率谱密度<sup>[11]</sup>为:

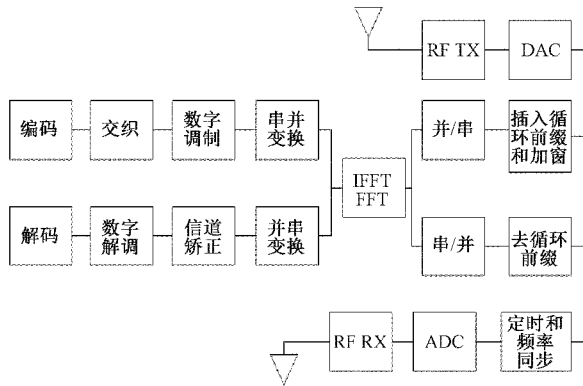


图 3 OFDM 通信系统物理层模型图

$$S_{X_{\infty}}(f) = \frac{S_X(f)}{\int_{-\infty}^{+\infty} S_X(f)df} \quad (2)$$

类似地,假设进入接收机的干扰信号为  $S_I(f)$ , 其功率为  $C_I$ , 其中  $S_{I,\infty}(f)$  代表在无限带宽上的归一化功率谱密度。

随信号  $S_X(t)$  一起进入接收机的除了干扰信号  $S_I(f)$  以外,还有自然噪声  $n(t)$ , 它在无限带宽上的功率谱密度假定为常数  $N_0$ , 其值一般在  $-230 \sim -201.5$  dBW/Hz 这一范围内<sup>[12]</sup>。本设计默认噪声功率谱密度为一常数  $-203$  dBW/Hz,如图 4 所示为干扰情况下信号接收模型。

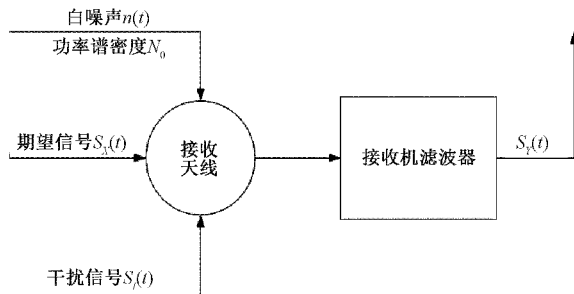


图 4 干扰情况下信号接收模型

谱分离系数是用来计算当一个外接信号随输入信号一起进入接收机而引起的噪声量,因此它可以作为用来比较同一波段不同信号之间的相互作用、干扰的程度<sup>[13]</sup>。UWB 信号和 OFDM 信号在无限带宽上的频谱分离系数  $k_{X,I}$  为:

$$k_{X,I} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{X_{\infty}}(f)S_{I_{\infty}}(f)df \quad (3)$$

在噪声与干扰并存的情况下,需要对载噪比重新定义,在分析 OFDM 信号对 UWB 干扰时,用等效载噪比表示 OFDM 干扰信号存在时 UWB 接收机的载噪比<sup>[14]</sup>,反之亦然。

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{eff} = \frac{C_s}{N_0} \left(1 + \frac{C_I}{N_0} * k_{X,I}\right)^{-1} \quad (4)$$

其中,  $\frac{C_s}{N_0}$  为 UWB 信号载噪比,  $\frac{C_I}{N_0}$  为 OFDM 信号载

噪比,  $k_{X,I}$  为频谱分离系数。可见,频谱分离系数越小,则载噪比的衰减量就越小,即干扰程度就越小。

获得相应等效载噪比后,将其转化为对应的接收机信噪比<sup>[15]</sup>。两者之间的对应关系为:

$$C/N_0 = SNR * B_n \quad (5)$$

同时,UWB 定位系统与 OFDM 通信系统发射信号需要经过相应的路径衰减模型到达接收端。路径损耗是电磁波传播的基本特征之一,与系统设计,链路预算相关,用以估计预期得到的接收功率。针对 UWB 系统非自由空间与 OFDM 通信系统的路径损耗计算模型<sup>[16]</sup>,传输损耗可以表示为:

$$PL(d) = PL_0(d_0) + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_s \quad (6)$$

其中,  $PL_0(d_0)$  是参考点  $d_0$  处的路径损耗,  $n$  是路径损耗指数,  $X_s$  是成对数正态分布的阴影衰落。针对不同的环境,路径损耗指数  $n$  有不同的参数,UWB 系统与 OFDM 系统传播路径损耗模型参数<sup>[17]</sup>如表 1 所示。

表 1 不同环境下,路径损耗因子经验参考值

UWB 传播路径		OFDM 传播路径	
场景	损耗指数	场景	损耗指数
室内住宅 LOS	≈1.7	自由空间	2
室内住宅 NLOS	3.5~5	城市	2.7~5
办公室 LOS	≈1.5	室内走廊	2.5~3
办公室 NLOS	2~4	办公室	1.8~2.8

### 3 互干扰仿真设计

#### 3.1 互干扰仿真系统

搭建 UWB 系统与 OFDM 系统室内环境下信号互干扰仿真模型。该仿真模型模拟了  $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 10\text{ m}$  的室内厂房模型,将 UWB 定位基站<sup>[18]</sup> 布置于四周,基于 OFDM 的单基站高功率通信系统(5G 微基站、WiFi 等)置于中央,并在该空间内随机分布数个 UWB 与 OFDM 一体化接收机,仿真会首先对受干扰情况下单个接收机的测距精度进行分析,再对信号互干扰对该室内空间中不同位置接收机的定位和通信性能进行仿真,如图 5 所示,为室内空间中两系统共存仿真模型。

OFDM 通信仿真平台通过参考 WiFi 最为常用的协议 802.11n,选用 16QAM 作为调制方式,每个 OFDM 符号传输 56 个子载波,FFT 点数设为 64,循环前缀长度 16,物理层信号参数可随协议的更新而任意配置。在分析 UWB 系统对 OFDM 系统干扰时,选用误码率作为参考指标。在室内空间中不同区域的信号接收机由于与干扰源和基站距离的不同而导致的不同等效信噪比,每个信噪比下传输  $N$  个 OFDM 符号,计算每个 OFDM 符号传输错误的 bit 数,然后再相加,得到该信噪比下的误码率。

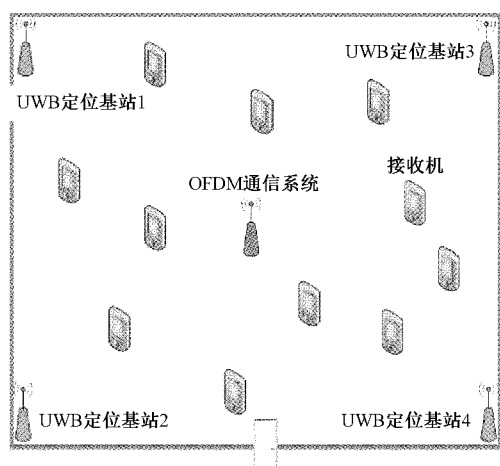


图 5 高功率单基站部署方式

UWB 定位系统仿真平台设计首先搭建物理层信号调制解调模型,设计时分多址的帧结构,再通过相关检测获得到达时。参考 802.15.4a 协议,选用 PPM 调制,脉宽 2 ns,脉冲重复间隔 100 ns,物理层信号参数可随协议的更新而任意配置。互相关函数的峰值处即为捕获到的脉冲信号的位置,同时也是信号的到达时间。

分析 OFDM 系统对 UWB 系统干扰时,选用定位精度作为参考指标。根据室内空间中不同区域的 UWB 接收机与 4 个发射基站以及 OFDM 干扰源距离的不同而导致不同的等效信噪比,在每个信噪比下根据信号传播时间求得与锚节点的距离,最后通过迭代最小二乘法进行节点定位。

在信号发射功率的配置上,根据 FCC 对 UWB 技术的定义,在 3.1~10.6 GHz 频段内 UWB 信号的发射功率需低于  $-41.3 \text{ dBm/MHz}$ ,则带宽为 500 MHz 的 UWB 信号发射功率需不高于  $-14.3 \text{ dBm}$ 。在该室内空间下,WiFi 信号发射功率一般为  $-10 \sim 0 \text{ dBm}$ ,为了保证信号良好覆盖性,实际应用中一般取 UWB 功率上限,故将 UWB 基站发射功率统一设为  $-14.3 \text{ dBm}$ ,OFDM 基站发射功率设为  $-10 \sim 0 \text{ dBm}$ ,且两者中心频点重合。仿真平台各关键参数配置如表 2 所示。

表 2 互干扰仿真平台参数设置

参数	取值
UWB 基站发射功率/dBm	-14.3
UWB 系统路径损耗系数 $n$	2
UWB 系统带宽/MHz	500
OFDM 系统带宽/MHz	20
OFDM 基站发射功率/dBm	$-10 \sim 0$
OFDM 系统路径损耗系数 $n_s$	2.2
中心频点/GHz	3.5

### 3.2 OFDM 系统对 UWB 系统干扰影响分析

对室内环境中基于 OFDM 的通信系统对 UWB 定位

系统的信号干扰进行仿真分析,首先要获取在干扰存在情况下某个确定位置的 UWB 接收机与 4 个锚节点的测距精度如图 6 所示,为中心频点重合,UWB 定位接收机与 OFDM 干扰源距离固定,各 UWB 基站与接收机距离不同时,不同 OFDM 发射功率下的 UWB 接收机等效载噪比曲线。

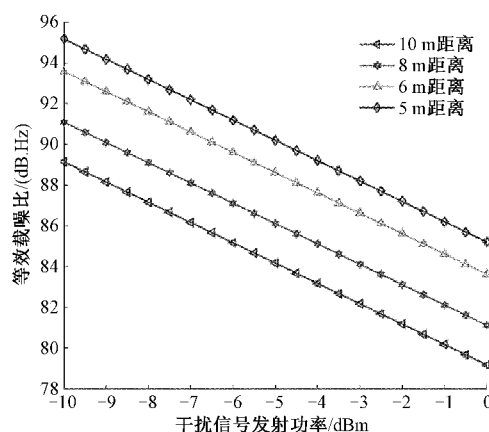


图 6 UWB 接收机等效载噪比

利用式(5)将等效载噪比转换为接收机信噪比后,获得 UWB 系统在相应信噪比下的测距精度如图 7 所示,由仿真结果可知,当与 UWB 基站和 OFDM 基站距离一定时,UWB 接收机的等效信噪比随干扰信号发射功率的减小而上升,测距精度也会随之上升,当 OFDM 信号发射功率低于  $-6 \text{ dBm}$  后,UWB 定位系统能够稳定在厘米级测距精度,即较低功率的 OFDM 通信系统不会对 UWB 系统测距精度产生明显影响。

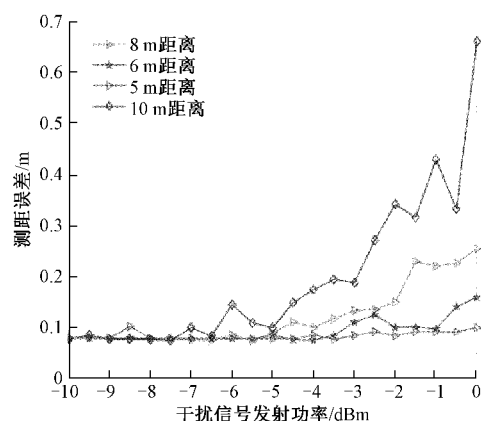


图 7 OFDM 发射功率与测距精度关系

获取待测目标与 UWB 基站测距精度后,利用迭代最小二乘法计算待测节点的定位精度,并通过仿真图直观地表现在室内空间中不同位置的定位精度。其中,UWB 定位基站置于空间的四周,发射功率为  $-14.3 \text{ dBm}$ ,OFDM 通信系统基站置于室内中央  $(0,0,2)$  位置处,发射功率为  $0 \text{ dBm}$ ,仿真结果截取了高度为 5 m 处横截面的各位置定位精度。



如图 8、9 所示,进行了有无 OFDM 同频干扰情况下的 UWB 定位性能对比仿真。当实验区域中存在同频 OFDM 信号干扰时,UWB 系统定位误差为 0.1~1.2 m,区域中心位置的 OFDM 信号干扰最强,UWB 定位误差为 1.2 m 左右;区域边缘位置 OFDM 干扰较小,定位误差为 0.1 m 左右。当离开 OFDM 基站 4 m 后,定位精度可以稳定在较高水平(0.4 m 以内)。当实验区域中不存在同频 OFDM 信号干扰时,由仿真结果可知实验区域定位精度在 0.1~0.6 m,中心区域定位误差最小,定位精度在 0.1 m 左右,仅在实验区域边缘部分,由于几何精度因子(GDOP)较差导致定位精度较低。

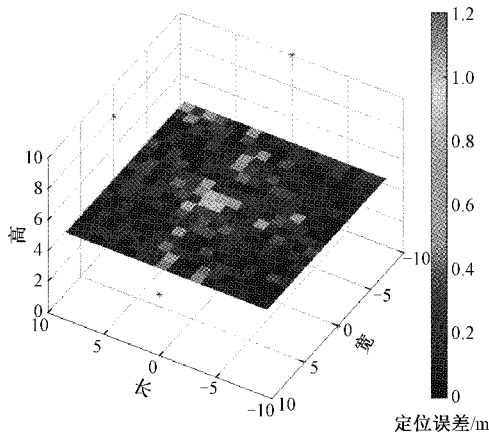


图 8 有干扰情况下 UWB 系统定位精度

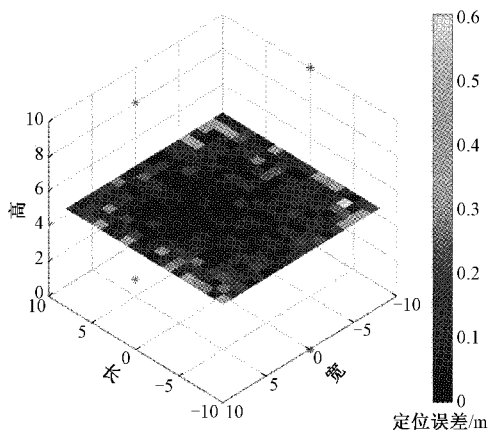


图 9 无干扰情况下 UWB 系统定位精度

上述实验表明,干扰存在时定位误差有明显提高,干扰中心部分定位误差会放大 12 倍以上。为保证实验空间的定位精度,需考虑信号兼容性设计或基站部署方式优化机制。

### 3.3 UWB 系统对 OFDM 系统干扰影响分析

对室内空间中 UWB 定位系统对 OFDM 通信系统的干扰影响进行仿真分析。如图 10 和 11 所示,为该室内环境下不同位置的 OFDM 通信系统误码率。当存在 UWB 同频信号干扰时,实验区域中 OFDM 误码率在  $10^{-3} \sim 10^{-5}$

范围内,由于 UWB 帧结构的时分多址设计,仿真结果统计接收机不同时间隙的最低信噪比,故在离干扰源较近的部分会对 OFDM 通信系统性能造成较大的不利影响,干扰源中心处误码率会高于  $10^{-3}$ 。当离开 UWB 基站 4 m 以后,OFDM 误码率稳定在  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  正常工作范围内。当不存在信号干扰时,实验区域 OFDM 系统的误码率在  $10^{-5}$  左右正常工作范围内,仅在距离通信基站较远的区域由于路径损耗导致的误码率轻微上升(空间边缘处误码率上升至  $10^{-4}$ ),但不会对系统的正常工作造成较大影响。

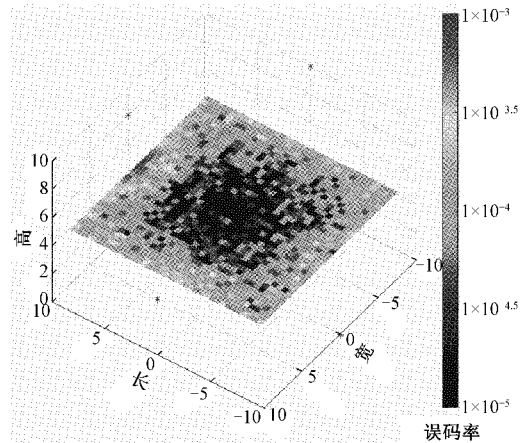


图 10 有干扰情况下 OFDM 通信系统误码率

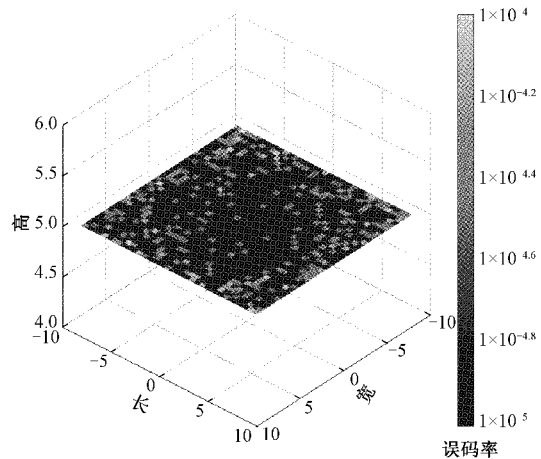


图 11 无干扰情况下 OFDM 通信系统误码率

## 4 分布式低功率微基站仿真

通过上节仿真分析可知,当 OFDM 通信系统置于实验区域中央,并以较大功率发射信号时,在区域中心部分会对 UWB 系统的定位性能造成较大不利影响。为了降低信号互干扰对实验区域内定位精度的损耗,利用当前热门的分布式微基站,对 OFDM 基站的部署方式进行优化设计。具体部署方式如图 12 所示,即将 1 个置于区域中心的发射功率为 0 dBm 的 OFDM 基站改为 4 个发射功率为 -10 dBm 的 OFDM 基站部署于区域四周。对该互干扰环境下

OFDM 系统通信性能和 UWB 系统定位性能进行仿真分析。

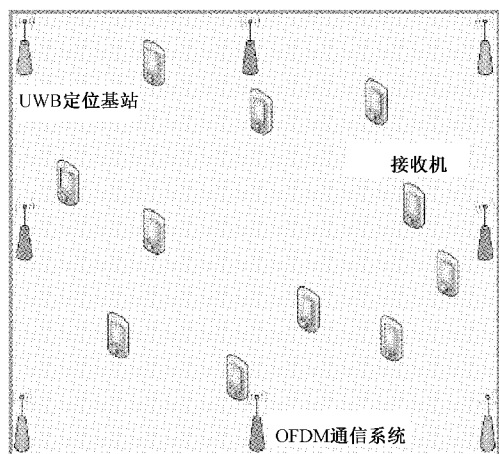


图 12 分布式低功率微基站部署方式

改变 OFDM 基站部署方式并降低信号发射功率后,如图 13、14 所示,在该互干扰实验区域内,OFDM 误码率在  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  范围内,离开 UWB 基站 4.3 m 左右后,OFDM 误码率稳定在  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  正常工作范围内,即与上节基站

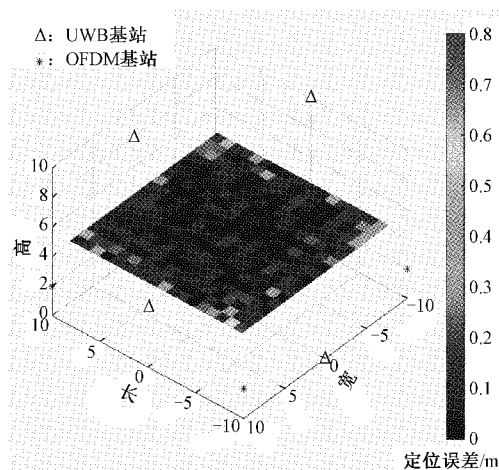


图 13 有干扰情况下 UWB 系统定位精度

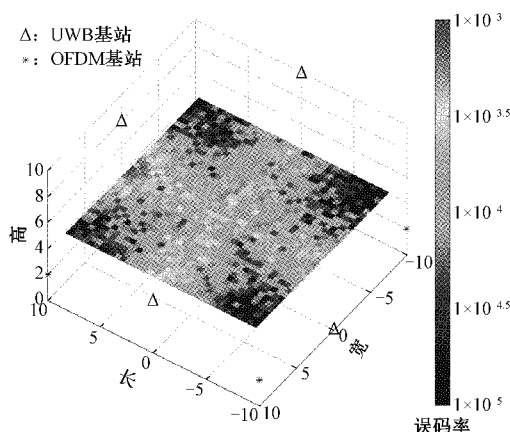


图 14 有干扰情况下 OFDM 通信系统误码率

部署方式相比,通信性能几乎不变;而由于较低发射功率的 OFDM 信号对 UWB 信号定位精度的影响甚微,因此整个实验区域内的定位精度在 0.1~0.8 m,中心区域误差最小,在定位误差在 0.1 m 左右,区域边缘受路径损耗和 OFDM 信号干扰影响,误差在 0.6 m 左右。

综上所述,通过 OFDM 通信系统部署方式的优化,可以保证在互干扰实验区域内通信能力不受影响情况下实现定位能力的明显提高,在成本可控的情况下该部署模式可以为 5G 与 UWB 通信定位一体化系统设计提供参考。

## 5 结 论

本文搭建了 UWB 定位系统、OFDM 通信系统的物理层模型,对两系统间的同频信号兼容性分析方法进行设计,提出了分布式微基站部署方式,并基于实际场景搭建互干扰仿真平台,对互干扰对定位和通信业务的干扰进行了验证。仿真结果表明,两者近距离同频共存时存在较大的信号互干扰,该干扰会对系统通信与定位能力造成不利影响,通过对 OFDM 基站部署方式优化后,可实现在通信性能几乎不受影响情况下定位性能的提高。

随着 UWB 定位系统和 5G 通信系统的发展和广泛应用,特定场景下两系统的同频共存不可避免,故针对两者间的互干扰分析以及兼容无干扰设计显得尤为重要。在未来 5G 通信系统与 UWB 定位系统的一体化设计和部署中,建议:1)特定场景下配置功率控制或合理的频率分配规划;2)设计信道管理机制,完善现有 UWB 协议;3)优化 UWB 信号体制设计,降低对其他信号干扰影响。

## 参考文献

- [1] 张宝军,陈曦,廖延娜,等.基于 DL-LSTM 的 UWB/INS 室内定位算法[J].传感器与微系统,2021,40(10):147-150.
- [2] ANASTASIA D, MAKSYM K, EDUARD S, et al. Coexistence analysis of 5G NR unlicensed and WiGig in millimeter-wave spectrum[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, DOI: 10.1109/TVT.2021.3113617.
- [3] LUCIANO C, AGOSTINHO L. Indoor coexistence analysis among 5G new radio, LTE-A and NB-IoT in the 700 MHz band[J]. IEEE Access, 2021, 8: 135000-135010.
- [4] 魏海涛,鲍亚川,蔚保国.基于偏移载波组合调制的卫星通信扩容设计与分析[J].无线电通信技术,2017,43(1):11-14.
- [5] 马艳军,吕爽,江蕾,等.5G 信号对 CMACast 卫星广播系统干扰测试[J].电子测量技术,2020,43(10):135-138.
- [6] 林文波.超宽带无线通信系统与其它无线通信系统的电磁兼容研究方法[J].电子制作,2014(11):167-168.

- [7] 吴迪. UWB室内定位和通信一体化技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [8] 张允. 5G终端设备电磁兼容测试标准简析[J]. 电子质量,2021(1):80-82,86.
- [9] 莫君. 面向通信导航融合系统的导航基带信号处理关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2019.
- [10] 钟亮,李晓东. 基于UWB的自适应小波与卡尔曼滤波定位算法[J]. 电子测量技术,2020,43(22):165-169.
- [11] SAID E, AMIRA Z, SALAH H, et al. A new fractal-like tree structure of circular patch antennas for UWB and 5G multi-band applications[J]. Microwave and Optical Technology Letters,2017,59(9):2168-2174.
- [12] KAI X, LIU X. Flexible multiplexing mechanism for coexistence of URLLC and mMTC services in 5G networks [C]. 2020 ITU Kaleidoscope: Industry-Driven Digital Transformation(ITU K), 2020: 1-9.
- [13] 安辉,张瀛瀚. 5G终端电磁兼容测试浅析[J]. 信息技术与政策,2019(5):39-42.
- [14] 李春霞,范建军,楚恒林. 频谱分离对功率增强条件下GPS信号干扰影响分析[J]. 测绘科学技术学报,2018,35(1):22-26.
- [15] 孙熔伟,张仿琪,郑国莘. 1.9 G FDD LTE基站抗干扰研究[J]. 电子测量技术,2019,42(19):46-52.
- [16] 毛文博. 窄带物联网与LTE及5G系统干扰共存研究[D]. 北京:北京邮电大学,2019.
- [17] 孙永江,邢云龙,于建成,等. 船载雷达设备电磁兼容研究与设计[J]. 国外电子测量技术,2017,36(3):43-46.
- [18] 吴翠先,周文敏,刘期烈,等. 一种新型的INS与UWB融合的室内行人跟踪方法[J]. 电讯技术,2021,61(8):971-978.

### 作者简介

崔宋祚, 硕士研究生, 主要研究方向为通信与定位一体化。

E-mail:1530521432@qq.com

蔚保国, 研究员, 主要研究方向为卫星导航、天地协同PNT。

E-mail:Woxgs@163.com

鲍亚川, 高级工程师, 主要研究方向为通信与定位一体化、受限空间PNT。

E-mail:baoyachuan@126.com