

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107364

# 802.15.4z 协议 LRP UWB 通导 融合信号体制研究与分析

李建佳 鲍亚川 蔚保国

(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:** 针对 IEEE 最新发布的 802.15.4z 协议的超宽带(UWB)物理层改动进行了分析,并基于 MATLAB 设计了低频脉冲超宽带(LRP UWB)3种工作模式以及高频脉冲超宽带(HRP UWB)的通信测距一体化系统,并在 802.15.4 的 CM1 信道条件下仿真对比了各个系统的误码率(BER)和测距精度来分析不同工作模式下的 UWB 系统性能特点。误码率仿真结果为 LRP UWB 低于 HRP UWB,而 LRP 长程模式误码最低,在信噪比 15 以上为  $10^{-4}$ ,说明长程模式的通信链路最稳定。测距仿真结果表明 LRP UWB 系统 3 种模式在 20 m 以内近距离测距性能上具有与 HRP UWB 系统精度相当,均为 0.1 m;而 LRP UWB 长程模式在 100 m 以上的远距离测距精度优于 0.1 m,其他几种模式精度均在 0.5 m 以上,说明长程模式更加适用于远距离测距。最后设计并仿真了脉冲累积测距系统的测距能力,其 100 m 距离以上测距精度优于 0.4 m,为长程模式单脉冲测距精度的 2 倍以上,说明使用脉冲累积测距技术可以进一步提升系统远距离测距能力。

**关键词:** 超宽带;802.15.4z;BPM-BPSK;PPM;OOK;测距

**中图分类号:** TN914.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Research and analysis of 802.15.4z protocol LRP UWB pass-through fusion signal regime

Li Jianjia Bao Yachuan Yu Baoguo

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

**Abstract:** Analyzed the changes to the ultra-wide band (UWB) physical layer of the latest IEEE 802.15.4z protocol, and designed three types of low frequency pulse ultra-wide band (LRP UWB) based on MATLAB working mode and high-frequency pulse ultra-wide band (HRP UWB) communication ranging integrated system, and under the conditions of 802.15.4 CM1 channel simulation and comparison of the bit error rate of each system (BER) and ranging accuracy to analyze the UWB system performance characteristics under different operating modes. The bit error rate simulation result is that LRP UWB is lower than HRP UWB, and the LRP long-range mode has the lowest bit error, and the signal-to-noise ratio is  $10^{-4}$  above 15, indicating that the long-range mode communication link is the most stable. The range simulation results show that the three modes of the LRP UWB system are comparable to the HRP UWB system in terms of range performance within 20 m, with an accuracy of 0.1 m, while the LRP UWB long-range mode has a better range accuracy than 0.1 m over 100 m, and the other modes have an accuracy of 0.5 m or more, indicating that the long-range mode is more suitable for long-range range. Finally, the range measurement capability of the pulse accumulation ranging system was designed and simulated, and its range accuracy was better than 0.4 m over a distance of 100 m, which is more than twice the accuracy of a single pulse in long-range mode, indicating that the use of pulse accumulation ranging technology can further improve the system's long-range range measurement capability.

**Keywords:** UWB;802.15.4z;BPM-BPSK;PPM;OOK;ranging

### 0 引言

2007年,IEEE 802.15.4a 标准发布,该标准将超宽带

物理层(ultra-wide band physical layer,UWB PHY)引入到已有的 WPAN 标准中,UWB 技术除了可以实现高效节能、高数据率的通信外,还能实现精确测距<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2021-07-23

此后国内外很多学者开始了对 UWB 技术的研究,文献[2]使用 MATLAB 仿真的方法研究了信噪比对 UWB 误码率的影响,结果表明信噪比对误码率的影响存在上限值,文献[3]设计了一种开关键控(on-off keying, OOK)调制的 UWB 发射机,符合 802.15.4a 协议的技术规范并且拥有 10 Mb/s 的数据速率。

随后 IEEE 协议组发布了 802.15.4-2011 版协议,并提出 UWB 用于测距具有高精度、抗多径等能力<sup>[4]</sup>。基于对 UWB 测距技术的研究,文献[5]搭建了 UWB 通信仿真系统,验证了 UWB 的良好抗多径能力,文献[6]自主设计了 UWB 收发系统,使用 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺优化了 UWB 接收机性能,使其能够在 20 m 的范围内实现 10 cm 测距精度。

在 2020 年发布的 802.15.4z 协议组将 UWB PHY 划分为 HRP UWB PHY 和 LRP UWB PHY,并且加入了使用低频脉冲超宽带(low frequency pulse ultra-wide band, LRP UWB)进行测距的相关技术,并规范了 LRP UWB 的测距信息交互流程,并且给出了建议的测距方法<sup>[7]</sup>。

目前对于 UWB 的研究存在以下问题,首先,目前大多基于早期 802.15.4a 协议的 UWB 技术,鲜有对于最新 LRP UWB 技术与通信测距一体化 UWB 体制的研究;其次,目前基于 802.15.4a 的 UWB 技术可达到的测距定位距离在 50 m 以内,距离较近<sup>[8-9]</sup>,在大空间内需要布站较多,浪费资源。

为填补目前对 802.15.4a/z 的分析空白,并探究远距离测距的 UWB 技术,首先对 802.15.4z 最新协议的 LRP UWB 和已有的高频脉冲超宽带(high frequency pulse ultra-wide band, HRP UWB)进行总结与对比分析,根据协议中 4 种 UWB 模式的标准,并基于 MATLAB 设计了 4 种 UWB 通信测距一体化仿真系统,并对 4 种模式进行误码率(bit-error-rate, BER)和测距精度的对比仿真试验,从而证明低脉冲重复频率的 LRP UWB 系统拥有更低误码率和更

远的测距距离,得到降低脉冲重复频率可提高系统测距距离及精度等能力的结论;最后,为了研究用于超远距离传输的 UWB 系统,设计了脉冲累积技术,使用该技术理论上可以提升接收机灵敏度从而达到提升 UWB 远距离测距能力,基于仿真系统实现脉冲累积,对比现有标准仿真能力来验证脉冲累积技术在 UWB 系统测距能力上的提升。

## 1 LRP UWB 符号结构与测距流程设计

### 1.1 LRP UWB 符号结构

根据 802.15.4 协议中的描述,LRP UWB PHY 支持如下 3 种传输模式<sup>[7]</sup>:基础模式,最高数据率;扩展模式,数据速率适中,但接收灵敏度更高;长程模式,最高接收灵敏度。

根据传输方式的不同,不同模式下的信号脉冲重复频率和数据传输速率不同,并且脉冲的调制方式也有所不同,长程模式使用脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM),扩展模式和基础模式使用 OOK 调制,如表 1 所示。

表 1 LRP UWB PHY 的传输模式及相应参数

模式	脉冲重复频率/MHz	数据速率	调制方式
长程模式	2.0	31.25 kb/s	PPM
扩展模式	1.0	250 kb/s	OOK
基础模式	1.0	1 Mb/s	OOK

3 种模式下对应的 LRP UWB PHY 符号结构也有所不同。

#### 1) 基础模式下的符号结构

在基础模式下,每个符号携带一个比特信息。基础模式下的 1 个符号为 1 个码片,含 1 个脉冲,PRF 为 1 MHz,符号时间  $T_{\text{sym}}$  是 1  $\mu\text{s}$ ,码片持续时间  $T_{\text{CHIP}}$  也是 1  $\mu\text{s}$ ,数据传输速率是 1 Mb/s,如图 1 所示。符号按照表 2 编码。

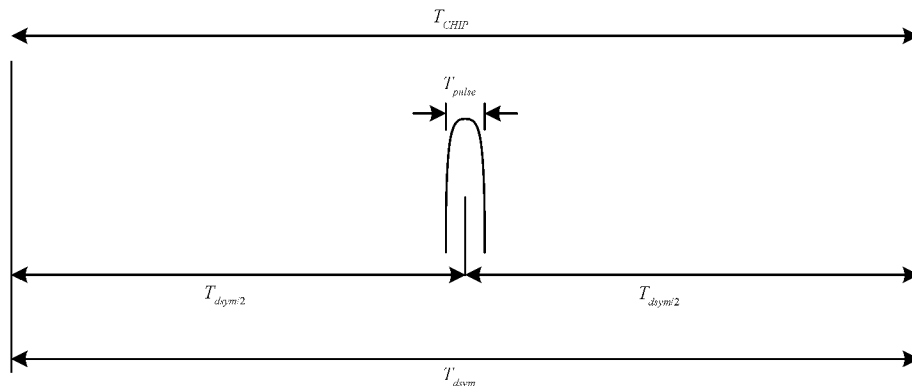


图 1 基础模式下 LRP UWB PHY 符号结构

#### 2) 扩展模式下的符号结构

在扩展模式下,1 个符号为 4 个码片,含 4 个脉冲,符号时间为 4  $\mu\text{s}$ ,因此数据传输速率为 250 kb/s,如图 2 所示。扩展

模式下脉冲按表 3 编码,根据脉冲输出值编码为 0 或 1。

#### 3) 长程模式下的符号结构

在长程模式下,每个符号由 64 个码片组成,符号时间

表2 基础模式下LRP UWB符号编码

被编码的二进制值	传输信号
0	在 $1\ \mu\text{s}$ 符号时间内没有能量被传输
1	单个脉冲在 $1\ \mu\text{s}$ 符号时间内传输

表3 扩展模式下脉冲的编码

脉冲输出值	传输码片
0	在这个码片时间内没有能量被传输
1	单个脉冲在这个码片时间内被传输

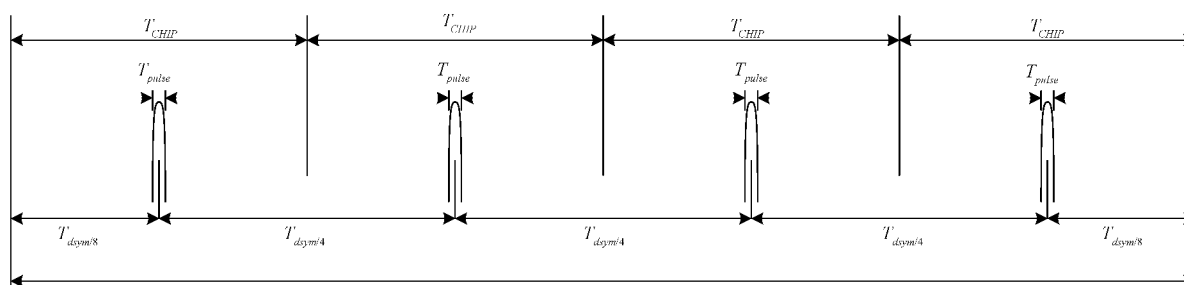


图2 扩展模式下LRP UWB PHY符号结构

为  $32\ \mu\text{s}$ ，并按照表4编码，每个符号仅有前半部分或后半部分传输32个脉冲，因此数据速率为  $31.25\ \text{kb/s}$ 。图3对此进行了图解说明。

1.2 LRP UWB 测距流程

最新发布的802.15.4z协议对LRP UWB测距技术进行了说明，首先适用于LRP UWB的测距方法为单边双向测距(single-sided two-way ranging, SS-TWR)和双边双向测距(double-sided two-way ranging, DS-TWR)两种。此

表4 长程模式LRP UWB符号编码

被编码的二进制值	传输信号
0	符号周期为 $32\ \mu\text{s}$ ，前 $16\ \mu\text{s}$ 没有能量传输，然后在第2个 $16\ \mu\text{s}$ 传输32个脉冲
1	符号周期为 $32\ \mu\text{s}$ ，前 $16\ \mu\text{s}$ 传输32个脉冲，然后在第2个 $16\ \mu\text{s}$ 没有能量传输

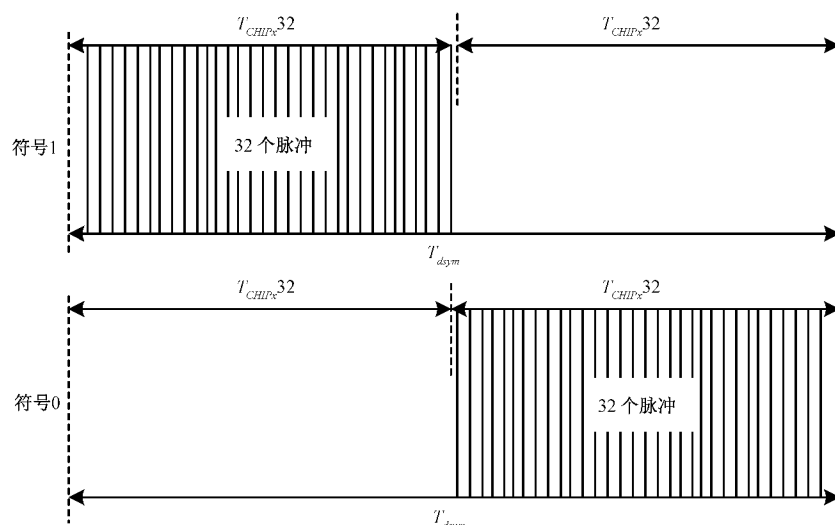


图3 长程模式下LRP UWB PHY符号结构

外，802.15.4z协议还对LRP UWB的测距信息交换进行了说明。以单边双向测距为例，SS-TWR的测量方法如图4所示，其中设备A启动测距交换，设备B响应以完成信息交换，而  $T_{prop}$  是测距帧在设备之间的传播时间<sup>[7]</sup>。

每个设备精确测量消息帧的发送和接收时间，因此可以通过简单的减法来计算时间  $T_{round}$  和  $T_{reply}$ 。因此，所得TOF可以通过如下公式将  $T_{prop}$  估计为：

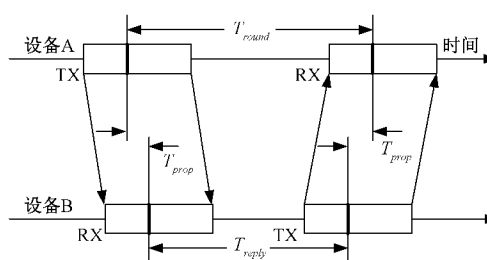


图4 SS-TWR方法原理

$$T_{prop} = \frac{1}{2}(T_{round} - T_{reply}) \quad (1)$$

其中,  $T_{round}$  可以在发送设备端测得, 而  $T_{reply}$  则需要从接收端获得, 发送端在从接收端获取  $T_{reply}$  时有 3 种可选择的方式。

1) 具有  $T_{reply}$  延迟回复的 SS-TWR 测距流程

对于具有  $T_{reply}$  延迟回复的 SS-TWR, 在接收设备收到信息返回确认帧(ACK)给发送方以完成测距信息交换后, 接收方的 mac 层将  $T_{reply}$  信息发送给其物理层, 再将  $T_{reply}$  信息发送到发送设备方。

2) 内嵌  $T_{reply}$  值的 SS-TWR 测距流程

对于内嵌回复时间结果的 SS-TWR, 在接收设备发送确认帧给发送设备前, 接收设备已确定  $T_{reply}$  值, 并将其内嵌在返回的确认帧中一同发送给发送设备。

3)  $T_{reply}$  固定的 SS-TWR 测距流程

如果应答设备对其应答信息的发送时间有精确的控制, 在这种情况下回复时间  $T_{reply}$  可以是一个收发设

备都已知的固定值, 不需要由接收方返回  $T_{reply}$  信息给发送方。

## 2 HPR UWB 符号结构

根据 802.15.4 协议中的描述, HPR UWB 符号结构以及调制方式如图 5 所示。调制方式结合了突发位置调制(burst position modulation, BPM)和二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK), 称为 BPM-BPSK 调制方式。其每个符号持续时间为  $T_{dsym}$ , 一个符号时间分为两个 BPM 区间, 每个 BPM 又等分为两部分, 每个 BPM 的前半部分为可能的突发脉冲位置, 而突发脉冲则是一系列的脉冲串组成, 每个脉冲时间为一个码片时间  $T_c$ 。每个符号由一个突发脉冲组成, 包含 2 比特信息。其中一个比特用来决定突发脉冲的位置, 另一个比特决定脉冲调制的相位。标准定义了多种突发脉冲长度来支持多种数据速率。HRP UWB 有多种脉冲重复频率可选, 最低为 8 MHz, 每个符号时间为 1  $\mu$ s。

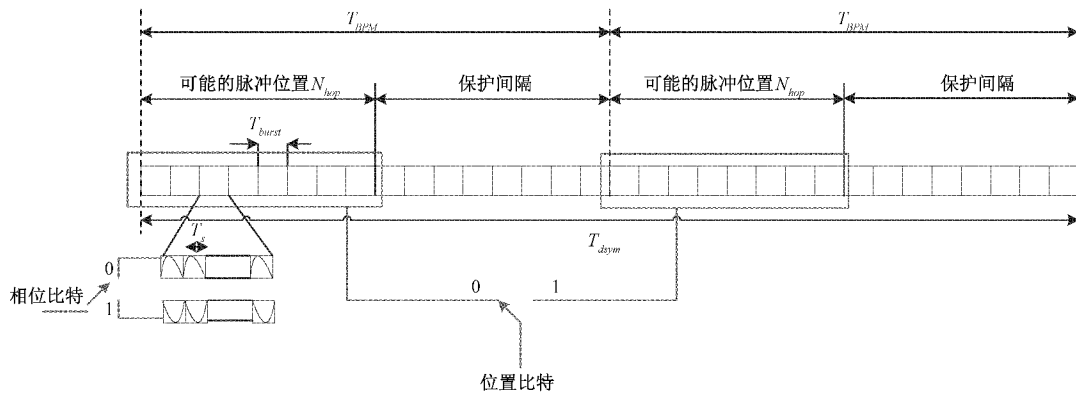


图 5 HRP UWB PHY 符号结构与调制方式

## 3 HRP UWB 与 LRP UWB 信号模型

根据协议描述, HRP UWB 调制方式为 BPM-BPSK, LRP UWB 的基础模式和扩展模式采用开关键控调制(OOK), 长程模式采用脉冲位置调制(PPM), 为了对 LRP UWB 信号体制进行分析研究, 使用 MATLAB 分别建立了采用 BPM-BPSK、OOK 和 PPM 调制方式的脉冲超宽带(IR-UWB)仿真系统, 符号结构分别按照协议中 HRP UWB、LRP UWB 基础模式、扩展模式、长程模式进行设置。

### 3.1 HRP UWB 信号模型

脉冲波形采用高斯函数的二阶导数。一个高斯脉冲  $p(t)$  可以用下列表达式描述:

$$p(t) = \pm \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2} = \pm \frac{\sqrt{2}}{\alpha} e^{-\left(\frac{2m}{\alpha}\right)^2} \quad (2)$$

式中:  $\alpha^2 = 4\pi\sigma^2$  是脉冲形成因子,  $\sigma^2$  为方差。

HRP UWB 采用 BPM-BPSK 技术实现信号调制, 对

于发射机而言 BPM-BPSK UWB 信号可以表示为<sup>[10-11]</sup>:

$$s(t) = \sum_{j=0}^{N_f-1} b_j \omega(t - jT_f - \delta_j a_j) \quad (3)$$

其中,  $N_f$  为接收信号的脉冲总数;  $t$  为发射机的时钟时间;  $\delta$  是 BPM 调制的时移; 发射机发射的数据序列  $\{a_j\}$  是携带某种信息的二进制(0 或 1)的比特流, 若数据符号为 1 时, 单周期脉冲将会增加  $\delta$  的脉冲时移; 若数据符号为 0 时, 则没有附加的调制时移;  $\{b_j\}$  是携带某种信息的二进制(0 或 1)的比特流, 若数据符号为 1 时, 即有正幅度脉冲发射; 若数据符号为 -1 时, 则有负幅度脉冲发射;  $\omega(t)$  表示被发送的单周期脉冲波形。

接收机收到的信号可表示为:

$$s_r(t) = A s_e(t - t_d) + n(t) \quad (4)$$

其中,  $A$  代表目标发射机发射的信号通过路径传播后到达接收机的幅度衰减(与距离和衰减系数因子有关);  $t_d$  代表发射机与接收机之间的传输时延; 接收端的噪声  $n(t)$  为加性高斯白噪声。

脉冲重复频率为 8 MHz, 每个符号时间为 1  $\mu$ s, 每个

符号分为前后两部分,只有其中一部分中含4个脉冲,等价于每1 μs 传输4个脉冲。设置发射功率为0 dBm,HRP UWB 采用 BPM-BPSK 调制仿真生成的脉冲信号如图6所示。

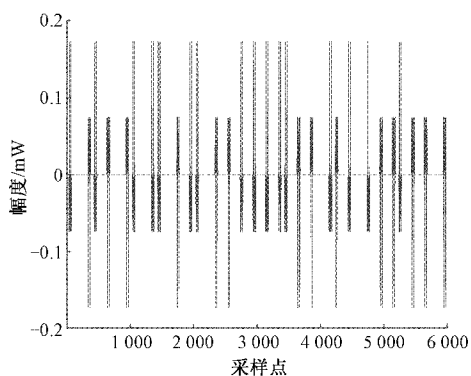


图6 HRP UWB BPM-BPSK 调制生成脉冲信号

### 3.2 LRP UWB 信号模型

#### 1) 基础模式和扩展模式信号模型

脉冲波形同样是高斯函数的二阶导数。基础模式和扩展模式均采用 OOK 实现信号调制。对于发射机而言 OOK UWB 信号可以表示为:

$$s(t) = \sum_{j=0}^{N_f-1} b_j \omega(t - jT_f) \quad (5)$$

其中,  $N_f$  为接收信号的脉冲总数;  $t$  为发射机的时钟时间;  $\delta$  是 PPM 调制的时移; 发射机发射的数据序列  $\{b_j\}$  是携带某种信息的二进制(0 或 1)的比特流, 若数据符号为 1 时, 即有脉冲发射; 若数据符号为 0 时, 则没有脉冲发射;  $\omega(t)$  表示被发送的单周期脉冲波形<sup>[8,12]</sup>。

接收机收到的信号可表示为式(4), 接收解调采用包括检测的非相干接收方式, 来实现信号的解调。

基础模式脉冲重复频率为 1 MHz, 每个符号时间为 1 μs, 每个符号含 1 个脉冲, 每 1 μs 传输 1 个脉冲。设置发射功率为 0 dBm, 其经 OOK 调制生成信号如图 7 所示。

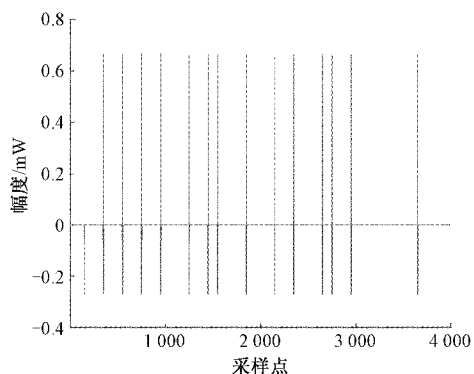


图7 基础模式 OOK 调制生成脉冲信号

扩展模式脉冲重复频率为 1 MHz, 每个符号时间为 4 μs, 每个符号含 4 个脉冲, 也等价于每 1 μs 传输一个脉

冲。设置发射功率为 0 dBm, 其经 OOK 调制生成信号如图 8 所示。

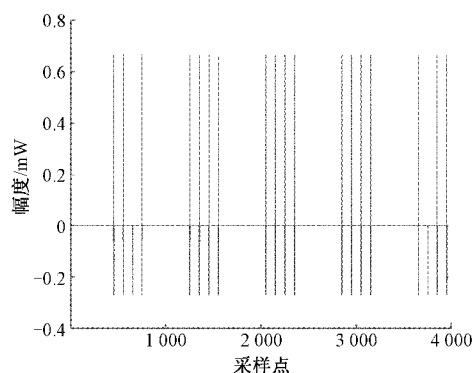


图8 扩展模式 OOK 调制生成脉冲信号

#### 2) 长程模式信号模型

脉冲波形同样是高斯函数的二阶导数。长程模式采用 PPM 技术实现信号调制, 对于发射机而言 PPM UWB 信号可以表示为<sup>[13-14]</sup>:

$$s(t) = \sum_{j=0}^{N_f-1} \omega(t - jT_f - \delta_j a_j) \quad (6)$$

其中,  $N_f$  为接收信号的脉冲总数;  $t$  为发射机的时钟时间;  $\delta$  是 PPM 调制的时移; 发射机发射的数据序列  $\{a_j\}$  是携带某种信息的二进制(0 或 1)的比特流, 若数据符号为 1 时, 单周期脉冲将会增加  $\delta$  的脉冲时移; 若数据符号为 0 时, 则没有附加的调制时移;  $\omega(t)$  表示被发送的单周期脉冲波形<sup>[13-16]</sup>。

接收机收到的信号可表示为式(4), 接收解调采用相干接收方式, 使用本地模板与接收信号做相关, 来实现信号的解调。

长程模式脉冲重复频率为 2 MHz, 每个符号时间为 32 μs, 每个符号分为前后两部分, 只有其中一部分中含 32 个脉冲, 同样等价于每 1 μs 传输一个脉冲。设置发射功率为 0 dBm, 其经 PPM 调制生成信号如图 9 所示。

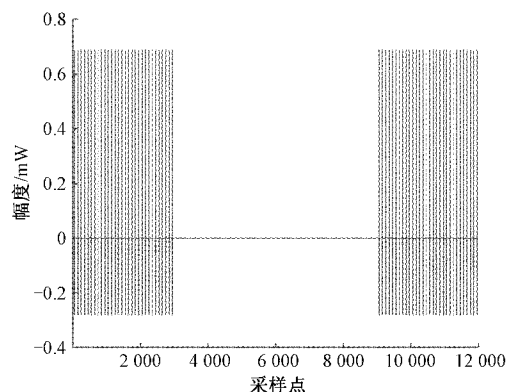


图9 长程模式 PPM 调制生成脉冲信号

根据仿真生成的脉冲信号可以看到, 由于 HRP UWB 每 1 μs 传输 4 个脉冲, 而 LRP UWB 3 种模式每 1 μs 传输



1 个脉冲,在发射功率均为 0 dBm 的条件下,LRP UWB 3 种模式的脉冲幅度相同,均为 0.682 mW,而 HRP UWB 的脉冲幅度为 LRP UWB 的 1/4,为 0.169 mW。

相同发射功率的条件下 HRP UWB 单脉冲峰值功率小于 LRP UWB,原因是在发射功率一定的情况下,减少单位时间内的脉冲数量,每个脉冲峰值功率更大,而这种设计理论上可增加传输距离。

#### 4 仿真设计与结果分析

针对 HRP UWB 搭建了 BPM-BPSK 调制与相干接收解调的仿真系统,针对 LRP UWB 的基础模式和扩展模式搭建了 OOK 调制和匹配滤波解调的仿真系统,针对长程模式搭建了 PPM 调制,相干接收解调的仿真系统,仿真系统结构如图 10 所示。基于仿真系统对 4 种模式下的误码率随信噪比变化的关系、测距精度等随信噪比变化的关系以及测距精度随最大测距距离变化的关系进行了仿真研究。

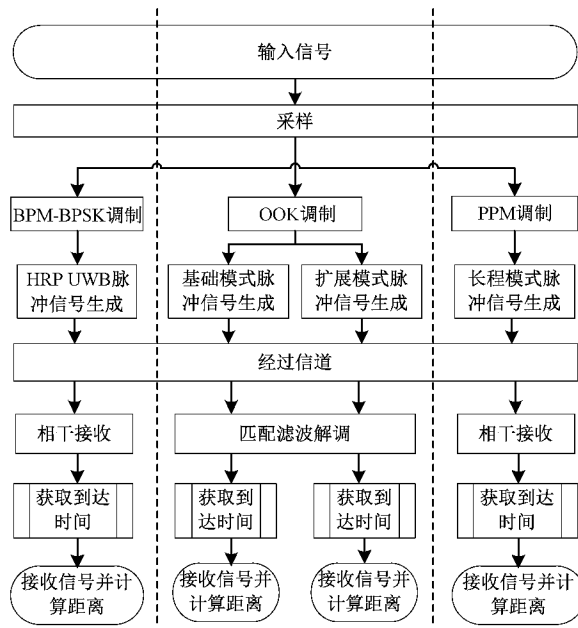


图 10 仿真系统结构

仿真参数设置如下,发射功率  $P_{ow}$  设为 0 dBm,信号采样频率  $f_s = 20$  GHz,二阶高斯脉冲宽度为  $T_m = 1$  ns,信道采用 802.15.4a 协议给出的室内多径 CM1 信道<sup>[17]</sup>,HRP UWB 仿真系统的 BPM 调制时移设为 5 ns,LRP UWB 长程模式仿真系统 PPM 调制时移设为 30 ns。

##### 4.1 系统误码率与信噪比关系

图 11 为 4 种模式下的仿真系统的误码率随信噪比变化的仿真结果,首先可以看到在低信噪比时,4 种模式系统误码率性能均较差;信噪比在 19 dBm 以内时,LRP UWB 3 种模式的误码率明显低于 HRP UWB,根据第 3 章对信号模型的介绍,HRP UWB 的脉冲幅度为 LRP UWB 的

1/4,在信噪比较低时 HRP UWB 接收信号更易受噪声影响,从而造成误检,这就导致了在信噪比低于 19 dBm 时 HRP UWB 系统误码率高于 LRP UWB 系统。

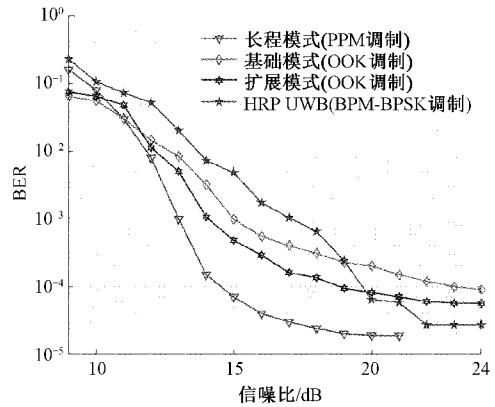


图 11 4 种模式误码率随信噪比变化曲线

在信噪比大于 19 dBm 时 HRP UWB 误码率低于基础模式和扩展模式,但高于长程模式,这是由于 HRP UWB 所用 BPSK 调制方式的欧氏距离大于基础模式和扩展模式所用 OOK 调制方式的欧氏距离,所以在信噪比高于 19 dBm 时 HRP UWB 系统误码率低于基础模式和扩展模式 UWB 系统。

在 LRP UWB 的 3 种模式中,长程模式整体的误码率明显低于其他量种模式,扩展模式的误码率则整体低于基础模式。这是因为对于 LRP UWB 的 3 种模式而言,其脉冲幅度相同,扩展模式和长程模式数据比特检测所依赖的脉冲数更多,接收灵敏度更高,检测结果更准确,故误码率关系为长程模式 > 扩展模式 > 基础模式。

##### 4.2 系统测距误差与信噪比关系

图 12 为 4 种模式下的仿真系统的测距误差随信噪比变化的仿真结果,一体化系统测距的方法是使用单边双向测距法,通过获取到达时间来计算测距值的。通过检测接收脉冲在时间轴上的位置作为脉冲到达时间,并取多个脉冲相对到达时间的平均值为信号到达时间来表征测距时延,因此测距精度很大程度上由误码率来决定。根据仿真结果可以看到,HRP UWB 在信噪比低于 19 dBm 时的测距精度低于 LRP UWB,例如在信噪比为 18 dBm 时,HRP UWB 测距误差为 0.246 m,基础模式测距误差为 0.182 m,扩展模式测距误差为 0.15 m,长程模式测距误差则为 0.1 m。在信噪比高于 19 dBm 时 HRP UWB 测距精度仅低于长程模式,例如信噪比为 20 dBm 时,HRP UWB 测距误差为 0.114 m,基础模式测距误差为 0.156 m,扩展模式测距误差为 0.129 m,长程模式测距误差则为 0.068 m。

##### 4.3 系统测距误差与测距距离关系

图 13 为 4 种模式下的仿真系统的测距误差随信噪比变化的仿真结果,可以看到在 4 种模式中,HRP UWB 的远距离测距能力最差,长程模式的远距离测距能力最佳,

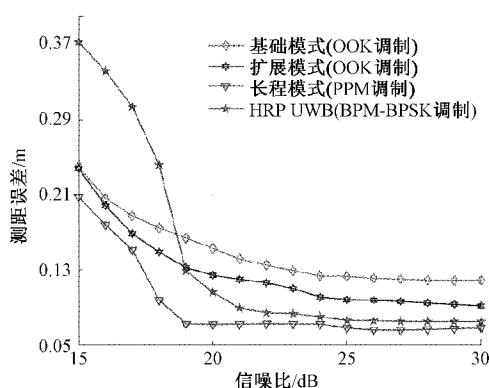


图12 4种模式测距误差随信噪比变化曲线

在测距距离为60 m时,HRP UWB测距误差为0.66 m,基础模式为0.29 m,扩展模式为0.21 m,而长程模式为0.09 m。

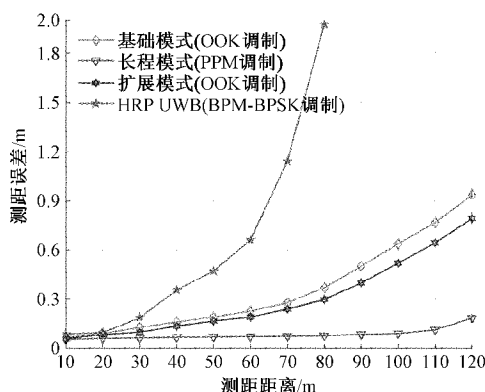


图13 4种模式测距误差随测距距离变化曲线

在测距距离为120 m时,长程模式测距误差依旧在0.2 m以内,而HRP UWB误差已超过2 m,基础模式误差为1 m,而扩展模式误差略低于基础模式,为0.8 m。

在测率误差同为0.2 m时,HRP UWB可实现30 m覆盖范围,基础模式可实现50 m覆盖范围,扩展模式可实现60 m覆盖范围,而长程模式则可实现120 m覆盖范围。

由于HRP UWB脉冲能量低于LRP UWB,而随着距离增加,路径损耗越大,所以脉冲误检的概率也会增加,这就导致了随着测距距离增加,测距误差也随之增大,超过一定距离后测距精度则会变得无法接受。而LRP UWB 3种模式的脉冲能量较高,所以能够进行更远的测距,而长程模式的接收灵敏度明显高于其他两种模式,所以其远距离测距精度最高,而扩展模式接收灵敏度高于基础模式,所以其远距离测距精度也略优于基础模式。

#### 4.4 LRP UWB 长程模式下的脉冲累计接收仿真

通过上述仿真说明接收灵敏度越高,其传输距离越远,测距精度越高。而提高接收灵敏度的方法除了使用多脉冲共同检测数据的方式,还可以使用脉冲累积技术。为了进一步研究提高脉冲灵敏度的方法,实现更远距离、更

高精度的测距,将LRP UWB长程模式每个符号中的相邻两个脉冲进行相干累积,将两个连续脉冲与本地模板信号相关后的信号幅度进行叠加作为接收信号中单个脉冲的幅度,这样叠加后的脉冲信号幅度要高于单个脉冲信号幅度,等效于提高了信噪比。

仿真参数设置与LRP UWB长程模式相同,在测距距离为100 m的条件下,图14为单个脉冲与2个脉冲累积方式的测距精度随信噪比变化关系。可以看到使用脉冲累积方法的测距精度明显高于单脉冲测距。当信噪比为16 dBm时,单脉冲的测距精度为0.218 m,而2个脉冲累积方式测距精度为0.09 m,精度为单脉冲测距的2倍以上。

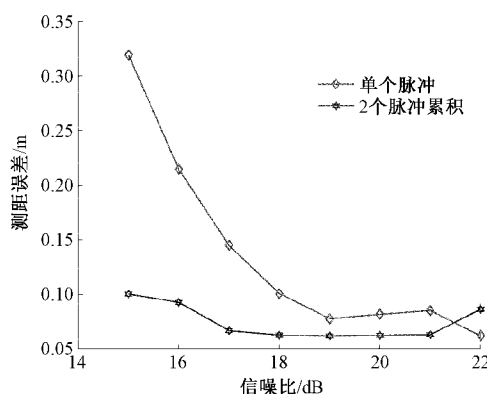


图14 单脉冲与脉冲累积的测距精度随信噪比变化曲线

图15为单个脉冲与2个脉冲累积方式的测距精度随测距距离变化关系。可以看到测距距离在100 m内时,两者的测距精度相当,而测距距离大于100 m时,2个脉冲累积方式测距精度明显高于单脉冲测距,在测距距离200 m时,单脉冲测距精度为1.05 m,而2个脉冲累积方式的测距精度为0.44 m,精度为单脉冲测距的2倍以上。

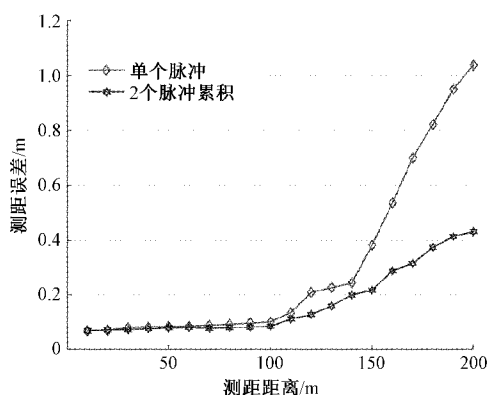


图15 单脉冲与脉冲累积的测距精度随测距距离变化曲线

## 5 结论

仿真表明,在相同发射功率条件下HRP UWB覆盖范围低于LRP UWB。但相对的,HRP UWB的通信数据速

率高于 LRP UWB。

而对于 LRP UWB 而言,长程模式由于其高接收灵敏度而表现了最佳的远距离测距能力。但其数据速率也是 3 种模式最低的,而扩展模式和基础模式则作为一种折中的存在,侧重于测距距离和数据速率两种能力的均衡。

从前的 UWB 更多的是作为一种高速通信手段,所以 HRP UWB 拥有很高的数据速率。但是随着 UWB 技术在室内定位中的广泛应用,其测距定位方面的性能越来越被看重,这也是 LRP UWB 提出的初衷,所以对于 LRP UWB 和 HRP UWB 的选择需要根据实际的需求进行应用。

HRP UWB 更适合用于搭建近距离通导一体系统;LRP UWB 的基础模式和扩展模式可应用于对覆盖范围有一定要求且对通信性能需求不高的通导一体系统;而 LRP UWB 的长程模式则可以考虑只是用其远距离测距定位能力并与其他高速通信技术(如 5 G)结合,实现远距离覆盖且高速率通信的高性能通导一体。

使用长程模式和脉冲累积技术结合实现更远覆盖范围的 UWB 技术与高速率高性能的通信技术(如 5 G 技术)相结合,实现远距离覆盖且高速率通信的高性能通导一体。

#### 参考文献

- [1] IEEE. IEEE standard for information technology-local and metropolitan area networks-specific requirements-part 11: Wireless LAN medium access control(MAC) and physical layer(PHY) specifications amendment 6: Wireless access in vehicular environments[J]. IEEE, 2010;1-486.
- [2] GOYAL M, PRAKASH S, XIE W, et al. Evaluating the impact of signal to noise ratio on IEEE 802. 15. 4 PHY-level packet loss rate[J]. IEEE, 2010,56(13): 279-284.
- [3] 张继红,方毅,黄鲁. 一种低功耗 OOK 调制超宽带发射机的实现[J]. 微电子学, 2014, 44(2):174-177.
- [4] XU K, HAAPOLA J. Performance measurements of DW1000 implementing IEEE standard 802. 15. 4-2011 impulse radio ultra-wideband technology[J]. Master Examensarbete, University of Oulu, Oulu, 2016, 7(4): 3-22.
- [5] 夏林杰,鹿凯宁. 基于 IEEE802. 15. 4a 信道的高性能脉冲超宽带系统[J]. 信息技术,2016,15(5):150-153.
- [6] 翟似禹. IR-UWB 收发机系统的研究与实现[D]. 上海:上海师范大学,2019.
- [7] Low-rate wireless networks [J]. In IEEE Std 802. 15. 4-2020 (Revision of IEEE Std 802. 15. 4-2015), 2020:1-800.
- [8] 罗雪涛,王雪,金彦亮. 存在强窄带干扰时基于 IEEE 802. 15. 6 协议的 IR-UWB 系统 TOA 估计[J]. 电子测量技术,2019,42(17):124-129.
- [9] 高健,陆阳,李庆巧,等. 采用三次通信的 TOF 与 TDOA 联合定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(3):66-73.
- [10] 武兴佩. TH-UWB 跳时超宽带多用户联合检测技术的研究[D]. 锦州:辽宁工业大学,2016.
- [11] 刁盛锡,林福江. 一种低功耗 OOK/DBPSK 超宽带发射机[J]. 微电子学,2020,50(4):527-531.
- [12] 王学伟,杨京. 动态测试信号模型及电能压缩感知测量方法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(1):92-100.
- [13] 王加敏,颜彪,杨银霞,等. 超宽带波形和调制技术研究[J]. 山西电子技术, 2010(2):52-53.
- [14] 宋保军,郑世杰,刘强. 超宽带 TH-PPM-UWB 信号及其功率谱的仿真模型研究[J]. 现代通信技术, 2012(2): 13-15.
- [15] 靳伟超. 基于 UWB 技术的井下定位系统接收机的研究[D]. 唐山:华北理工大学,2019.
- [16] 李荣冰,王念曾,刘建业,等. 面向相对导航的 UWB 测距误差估计与补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2019, 40(5):28-35.
- [17] 杨力,季茂荣,张卫平,等. 基于 IEEE 802. 15. 4a 信道的超宽带脉冲信号仿真研究[J]. 系统仿真学报,2012, 24(10):2172-2176.

#### 作者简介

**李建佳**,硕士研究生,主要研究方向为 UWB 定位技术信号协议、算法与系统。

E-mail:detuo007@qq.com

**鲍亚川**,博士,主要研究方向为卫星导航、高精度时间同步。

E-mail:baoyachuan@126.com

**蔚保国**,研究员,主要研究方向为卫星导航系统总体设计。

E-mail:ybg@sina.com