

脉冲超宽带信号调制技术分析

孟祥利 侯孝民 廉昕

(中国人民解放军装备学院 北京 101416)

摘要: 脉冲超宽带信号的单脉冲形式能够影响到传输信号的功率谱密度,单脉冲形式的选择应遵循频谱利用率高,抑制干扰灵活,脉冲产生容易等原则。对于信息数据的调制主要有基于幅度的调制(PAM)和基于时延相位的调制(PPM),主要的多址技术有跳时(TH)扩频调制、直接序列(DS)扩频调制,最主要的两种基本调制方式是 TH-PPM 和 DS-PAM。采用高斯脉冲,将脉冲波形调制,跳时技术,直接扩频技术组合在一起,组成一种新的组合调制方式 DS-TH-PSM 调制,使一种信号具有 3 个属性,降低了信号捕获时判决的难度,增加了系统的安全性。

关键词: 单脉冲形式;信息调制;多址方式;组合调制

中图分类号: TN914.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Analysis of IR-UWB signal's modulation

Meng Xiangli Hou Xiaomin Lian Xin

(Equipment Academy of PLA, Beijing 101416, China)

Abstract: The single pulse mode of IR-UWB can affect the single pulse mode to the power spectral density of the transmitted signal, the single pulse mode selection should follow the principles that high spectrum efficiently, interference suppression flexible pulse generator easy. For information on data modulation are mainly based on the amplitude modulation (PAM) and based on delayed phase modulation (PPM), when the main multiple access technologies hop (TH) spread spectrum modulation, direct sequence (DS) spread spectrum modulation, most the main two basic modulation is TH-PPM and DS-PAM. Gaussian pulse, the pulse waveform modulation, time-hopping technology, direct spread spectrum technology together to form a new hybrid modulation DS-TH-PSM modulation.

Keywords: single pulse mode; information modulation; multiple access; hybrid modulation

1 引言

脉冲超宽带通信是指利用脉宽为纳秒级的脉冲作为载体的无线通信技术,具有抗干扰能力强,数据传输速率高,抗多径效应强,能够实现频谱资源共享,具有较强的隐蔽性和抗截获性等一系列优点,近年来受到了人们的广泛关注。脉冲超宽带信号的调制是其中一项重要技术,单脉冲形式、脉冲宽度、脉冲重复频率、数据信息调制方式、多址方式等信号元素和形式都会影响到脉冲超宽带信号的通信性能。本文首先对脉冲超宽带信号的单脉冲形式、数据信息调制方式、多址方式和基本调制方式进行概括分析,在此基础上提出一种新的组合调制方式,降低了判断规则的难度,增加了系统的安全性。

2 单脉冲形式

脉冲超宽带信号的单脉冲形式能够影响到传输信号的

功率谱密度,单脉冲形式的选择应遵循频谱利用率高,抑制干扰灵活,脉冲产生容易等原则,常用的脉冲超宽带信号单脉冲形式有很多种,主要有高斯脉冲及其各阶微分形式脉冲,瑞利函数单脉冲,基于正弦波及其包络调制的脉冲,升余弦脉冲、Hermite 多项式脉冲^[1-2],基于长球面波函数的脉冲等。其中,高斯脉冲及其各阶微分是最常用的脉冲超宽带单脉冲波形。下面主要对高斯脉冲及其微分形式和瑞利脉冲进行分析。

1)高斯脉冲及其各阶微分是最常用的脉冲超宽带单脉冲波形。高斯脉冲的时域表达式为^[3]:

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

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

对应的高斯脉冲的功率谱表达式为:

$$|P(f)|^2 = \exp(-(2\pi f\sigma)^2) \quad (2)$$

根据式(2),当 $f = 0$ 时, $|P(f)|^2 = 1$, 高斯脉冲大部分能量都集中在低频部分,且含有直流分量,不利于信号的辐射,所以高斯脉冲在实际的工程应用中并不合适。高斯脉冲的时域和功率谱密度如图1所示,脉冲成形因子取 $\alpha = 0.4 \times 10^{-9}$ 。

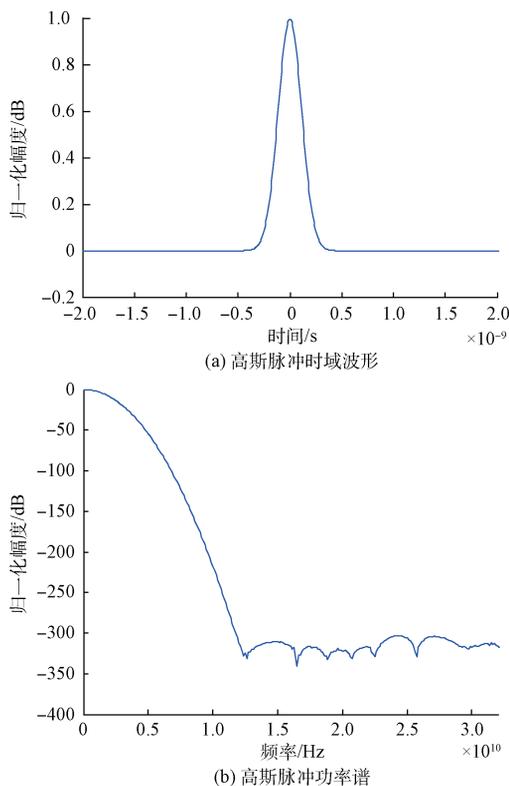


图1 高斯脉冲时域及其功率谱波形

α 影响脉冲的宽度和幅度,通过改变 α 值可以得到不同脉冲宽度的单脉冲信号。由图2可知,随着 α 值的增大,脉冲宽度也增大,而信号的带宽减小。

在实际的应用与研究中,由于高斯脉冲含有较多的直流分量,应用最多的是高斯脉冲的一阶微分和二阶微分,其时域表达式分别为:

$$p_1(t) = \frac{-t}{\sqrt{2\pi\sigma^3}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) = \frac{4\sqrt{2}\pi t}{\alpha^3} \exp\left(-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}\right) \quad (3)$$

$$p_2(t) = \frac{\sigma^2 - t^2}{\sqrt{2\pi\sigma^5}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) = \left(1 - 4\pi \frac{t^2}{\alpha^2}\right) \exp\left(-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}\right) \quad (4)$$

对应的功率谱密度函数为:

$$P_k(f)^2 = 4\pi^2 f^2 \exp(-(2\pi f\sigma)^2) \quad (5)$$

$$P_k(f)^2 = 16\pi^4 f^4 \exp(-(2\pi f\sigma)^2) \quad (6)$$

高斯脉冲的1~15阶微分的功率谱密度如图3所示,仍取 $\alpha = 0.4 \times 10^{-9}$ 。

由图3可知,当脉冲成形因子相同时,功率谱密度随着

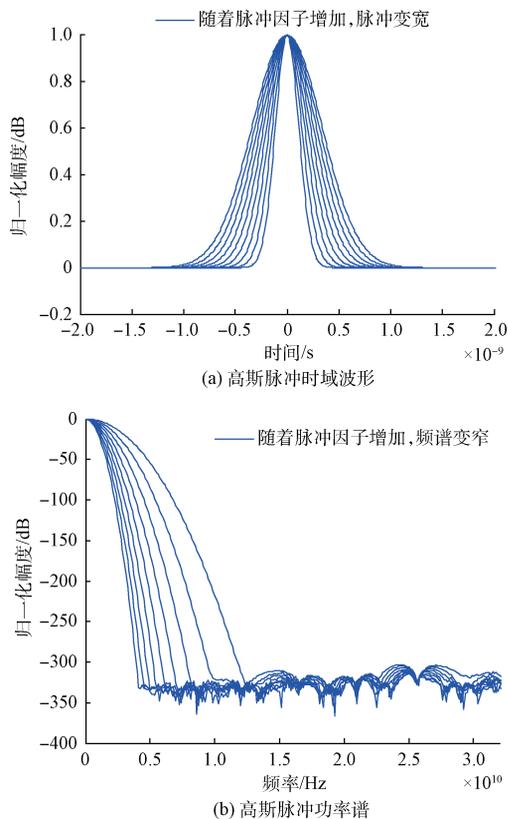


图2 不同宽度脉冲的时域及其功率谱

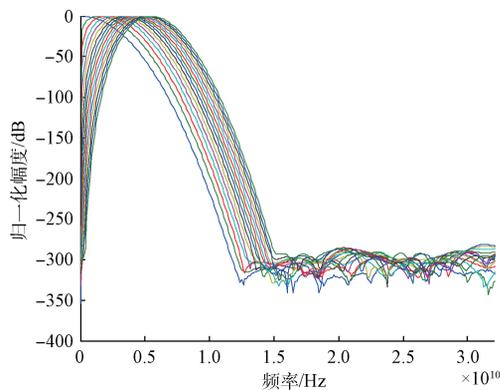


图3 高斯1~15阶微分功率谱波形

阶次 K 的增大而增大。此外,为了满足一定的需要,还可以使用 α 值相同或者不同的高斯脉冲高阶微分作为一组基函数,对每个基函数乘以一定的权重系数后进行线性组合,得到新的脉冲形式。

2)瑞利 n 阶脉冲与高斯 $n+1$ 脉冲相似,瑞利脉冲的时域表达式为:

$$p_R(t) = \frac{t}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中: σ^2 为方差,决定了脉冲的形状。令 $\alpha^2 = 4\pi\sigma^2$ 为脉冲成形因子,可得瑞利脉冲的另一种表达式:

$$p_R(t) = \frac{4\pi t}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}\right) \quad (8)$$

瑞利脉冲的频谱为:

$$P_R(f) = j \sqrt{2\pi} \cdot 2\pi\alpha f \cdot \exp\left(-\frac{(2\pi\alpha f)^2}{2}\right) = \sqrt{2\pi}\alpha f \cdot \exp\left(-\frac{\pi(\alpha f)^2}{2}\right) \quad (9)$$

取 $\alpha = 0.6 \times 10^{-9}$, 瑞利脉冲的时域波形和功率谱如图 4 所示。

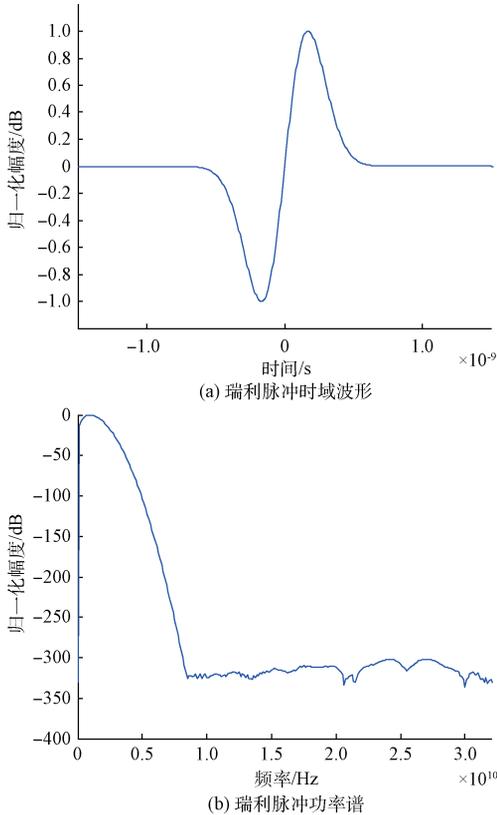


图 4 瑞利脉冲时域和频谱波形

3 信息调制方式

对于信息数据的调制主要有基于幅度的调制和基于时延相位的调制(PPM),其中基于幅度的调制主要有脉冲幅度调制(PAM)、开关键控脉冲(OOK)调制和双相脉冲调制(BPSK) 3 种基本方式。此外还有数字脉冲间隔调制(DPIM)、脉冲波形调制(PSM)、多维双正交键控调制(M-BOK)等调制方式。

3.1 PAM

PAM 调制是指将数据信息调制到超宽带脉冲的幅度上,设调制信息为 $b_k, k = 0, 1, 2, \dots$, 则 PAM 调制的数学表达式为:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k p(t - kT_f) \quad (10)$$

式中: $p(t)$ 表示基本脉冲信号, T_f 表示脉冲周期。

3.2 OOK

OOK 调制的数学表达式为:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k p(t - kT_f) \quad (11)$$

式中: $p(t)$ 表示基本脉冲信号, T_f 表示脉冲周期, b_k 的取值是 0 或 1, 当调制数据为 1 时, b_k 取值为 1, 发送信号, 否则不产生脉冲信号。从 OOK 调制的表达式可以看出, OOK 调制实际上是 PAM 调制的一种特例。

3.3 BPSK

BPSK 调制的数学表达式为:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k p(t - kT_f)$$

式中: $b_k = \begin{cases} -1, & \text{发送数据为 0} \\ 1, & \text{发送数据为 1} \end{cases} \quad (12)$

比较 OOK 调制和 BPSK 调制的表达式, 可以看出它们有相同的表达形式, 但调制数据不同。BPSK 用 2 个正相反的脉冲分别表示 0 和 1^[4], 实际上也是 PAM 调制的一种特殊形式。

3.4 PPM

PPM 调制与传统的连续波调制不同, 它是一种通过改变脉冲时间位置的调制方式。最常见的 PPM 调制为 2-PPM。其基本原理是: 当发送的信息数据码为 1 时, 信号脉冲在时间上偏移 δ_p , 当发送的信息数据码为 0 时, 信号脉冲位置不变, 其脉冲间隔为脉冲周期。PPM 调制的数学表达式为^[5]:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p(t - kT_f - b_k \delta_p) \quad (13)$$

式中: $b_k = \begin{cases} 0, & \text{发送数据为 0} \\ 1, & \text{发送数据为 1} \end{cases}$ 为发送的信息数据码, δ_p 为脉冲信号在时间上的偏移量。

3.5 PSM

PSM 调制是一种新的脉冲超宽带信号调制方式, 其原理是利用一组正交的脉冲波形来表示不同的信息。PSM 调制可以分为两类, 一是直接使用相互正交的不同载波来表示信息, 二是将几个载波进行随机加权, 形成一组正交的脉冲来调制信号。

对比 PAM 调制和 PPM 调制, PPM 调制对信号传输过程中幅度变化的要求不大, 在干扰噪声较大的情况下, 仍能够正确的接收信息, 但是对传输的延迟非常敏感, 对同步技术要求比较高。PAM 调制对传输的时延不敏感, 但是对于 PAM 信号的解调依赖于幅度的检测, 当干扰噪声比较大时, 会影响信号的正确接收。

4 多址方式

连续重复的脉冲如果没有经过特殊处理, 在脉冲重复频率的倍数上会产生许多非常强烈的谱线, 这些规律的尖锐的谱线可能会对其它通信系统产生干扰。为此, 运用扩频通信的技术原理, 对超宽带信号进行多址处理。主要的

多址技术有跳时 (TH) 扩频调制、直接序列 (DS) 扩频调制^[6]。

1) 跳时扩频调制技术是一种以伪随机序列控制射频信号的发送时刻和持续时间的扩展频谱技术。时间跳变系统使发射信号在时间域内离散地跳变。将时间轴分成许多时隙, 这些时隙在时间跳变扩频通信中通常称为时片 (time chip), 若干时片组成 1 帧, 称为跳时时间帧。在跳时时间帧内的哪个时片发射信号由扩频码序列进行控制。

2) 直接序列调制扩展频谱通信系统, 简称直接序列系统或直扩系统, 是用信息数据与高速率的伪噪声 (伪随机码) 的波形相乘后, 去控制载波信号的某个参量, 来实现扩展传输信号带宽的目的。用于频谱扩展的伪随机序列称为扩频码序列^[7], 最常用的为 m 序列。

在起始的脉冲超宽带通信研究中, 采用直接扩频方式调制, 脉冲极性反转比较困难, 以采用跳时扩频技术为主。但随着研究的深入, 由于脉冲超宽带通信中所采用的脉冲极窄, 采用跳时技术对定时器件的要求很高, 所以近期主要以采用直接扩频技术为主。

5 基本调制方式

常见的脉冲超宽带信号的基本调制方式有 TH-PAM、TH-PPM 和 DS-PAM, 其中最主要的是 TH-PPM 和 DS-PAM 两种, 下面对这两种调制方式进行分析。

5.1 TH-PPM^[8]

TH 是指采用跳时多址技术, 将每个脉冲周期分解为多个 chip, 脉冲具体出现在哪个 chip 是由时间跳跃序列的伪随机码来确定的。如上介绍, PPM 是指采用基于时延相位的调制, 当发送比特 0 时, 脉冲位置相对于原来的位置没有发生平移, 当发送比特 1 时, 脉冲位置相对于原来的参考位置平移 δ , δ 通常是脉冲宽度的 $1/4$ 。TH-PPM 调制的结构如图 5 所示。



图 5 TH-PPM 调制结构

TH-PPM 调制的信号模型的表达式为:

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} p(t - jT - c_j T_c - \delta d_{[j/N_s]}) \quad (14)$$

式中: d 为信源输出的二进制信息数据, 下标 $[j/N_s]$ 代表第 $[j/N_s]$ 个数据比特, $[\cdot]$ 表示取整; c_j 为跳时扩频序列码, 周期为 N_s ; $p(t)$ 为单个 UWB 脉冲; T 为帧周期 (脉冲重复周期); T_c 为码片时隙, 共 N_c 个, $T_c \cdot N_c = T$; δ 为 PPM 调制脉冲时移。

重复编码器将二进制信息 d 每个比特重复 N_s 次, 与一个周期的跳时扩频序列相互一一对应, 共同决定各个脉冲的位置, 但二者对脉冲位置的控制是互相独立的。跳时码 c_j 决定脉冲处于哪个时隙上; 而二进制数据 d 决定脉冲时

移, 当数据码为“0”时, 脉冲不进行时移; 当数据码为“1”时, 脉冲进行 δ 时移^[9]。

利用 MALAB 进行仿真, TH-PPM 调制的时域波形如图 6 所示, 取脉冲宽度 $T_p = 2$ ns, 脉冲重复周期 $T_f = 10$ ns, 跳时码进制 $M = 3$, 伪随机码码长 $N_s = 62$ 。

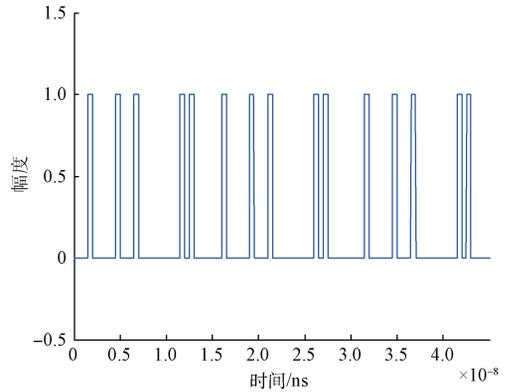


图 6 TH-PPM 调制示意图

5.2 DS-PAM^[10]

DS 是指采用直扩的多址方式, 首先用信息码与伪码序列进行模 2 加, 得到新的发送序列, 用此新的序列来控制脉冲的幅度。DS-PAM 调制的结构如图 7 所示。

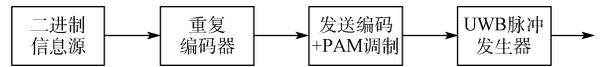


图 7 DS-PAM 调制结构

DS-PAM 调制的信号模型的表达式为^[11]:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{N-1} d_n \cdot c_j \cdot p(t - nT_f - jT) \quad (15)$$

式中: d_n 为信源输出的二进制信息数据, 下标 n 代表第 n 个数据比特; c_j 为伪随机码序列, 周期为 N_s ; $p(t)$ 为单个 UWB 脉冲; T_f 为 1bit 持续时间, 即伪码时间周期, 伪码速率为 N_s/T_f ; T 为帧周期 (脉冲重复周期), $T = T_f/N_s$ 。

重复编码器将二进制信息 d_n 每个比特重复 N_s 次, 相应与一个周期的伪码序列进行模 2 加得到混合码, 再利用该混合码对单脉冲 $p(t)$ 进行 PAM 调制。这里采用 BPM 或 BPSK 调制。当调制数据为“1”时, 发射一个正极性脉冲; 当调制数据为“0”时, 发射一个负极性脉冲^[12]。

利用 MATLAB 进行仿真, 脉冲宽度 $T_p = 2$ ns, 伪码速率 $R_s = 102.3$ Msps, 伪码码长 $N_s = 1\ 023$, DS-PAM 调制信号的时域波形如图 8 所示。

6 一种新的组合调制方式

采用高斯脉冲, 将脉冲波形调制, 跳时技术, 直接扩频技术组合在一起, 组成一种新的组合调制方式 DS-TH-PPM 调制, 其产生过程如图 9 所示。

首先将信源产生的信息重复编码, 通过数据选择器, 发

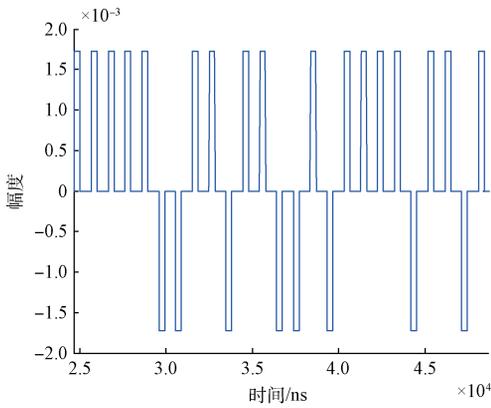


图 8 DS-PAM 调制示意图

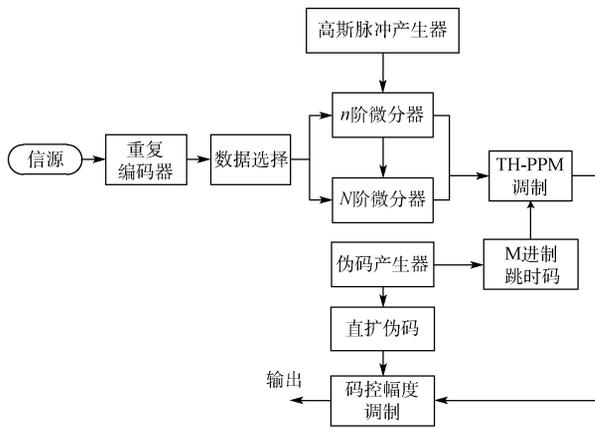


图 9 DS-TH-PSM 调制过程

送数据“1”时采用高斯 n 阶脉冲,发送数据“0”时采用高斯 $n+N$ 阶脉冲,伪码产生器产生 M 进制伪随机跳时码,与数据信息共同进行 TH-PPM 调制,同时伪码产生器产生直扩伪码,对脉冲幅度进行控制,发送数据“1”时,采用正极性脉冲,发送数据“0”时,采用负极性脉冲。这样,调制后的信息具有了 3 个属性,降低了判决规则的难度,进一步增加了系统的安全性。DS-TH-PSM 调制方式仿真如图 10 所示。

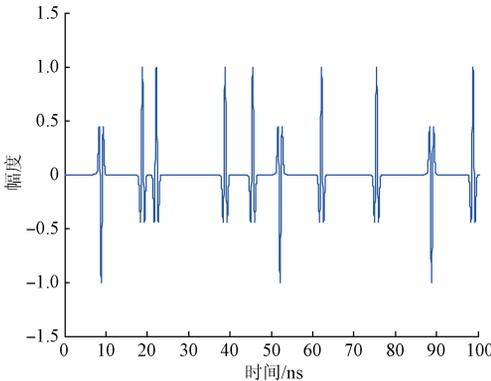


图 10 DS-TH-PSM 调制示意图

仿真采用 5 级 m 序列产生器产伪码,伪码周期 $N_c = 31$,跳时码进制 $M = 3$,脉冲宽度为 $T_p = 2$ ns 脉冲重复周期 $T_f = 10$ ns,脉冲成形因子 $\alpha = 1$ ns,仿真采用高斯一阶脉冲和高斯二阶脉冲。

7 结 论

本文对脉冲超宽带信号的单脉冲形式,信息调制方式,多址方式,基本调制方式做了详细的分析,为脉冲超宽带的深入研究提供了参考。在此基础上,提出了基于脉冲波形调制、跳时多址、直接扩频多址的组合调制方式,使一种信号具有了 3 个属性,降低了信号捕获时判决的难度,增加了系统的安全性。

参考文献

- [1] 高凡, 陈学卿. 超宽带脉冲产生研究[J]. 微计算机信息, 2010, 26(12-2): 194-195, 220.
- [2] 崔意奇. UWB 脉冲发生器设计[D]. 湘潭:湘潭大学, 2010.
- [3] 李海涨. 超宽带脉冲波形设计及调制技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010.
- [4] 殷露. 超宽带通信系统发射机的软件仿真与研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [5] 庄陵. 超宽带无线通信信号 PSD 研究及脉冲波形设计[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- [6] 莫秀玲. 超宽带无线通信系统中 Rake 接收技术的研究[D]. 吉林:吉林大学, 2010.
- [7] 王九九. 直接序列扩频超宽带抗干扰技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009.
- [8] ZHANG T T, ZHANG Q Y, XU H G, et al. A practical ranging method using IR-UWB signals[C]. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference(IWCMC) 2013: 1839-1844.
- [9] 王鹏毅. 超宽带隐蔽通信技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- [10] 王瑞军, 谢京稳, 王鹏毅. 基于 UWB 的多目标测控通信技术[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(4): 7-11.
- [11] 赵陈亮. 典型超宽带信号的发射与接收技术[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
- [12] 张倍荣. 多径信道下的 IR-UWB 同步捕获算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.

作者简介

孟祥利,1991 年出生,硕士研究生,主要研究方向为空间飞行器测控系统、脉冲超宽带技术。

E-mail:10211193@bjtu.edu.cn