

超宽带冲激无线电性能比较*

岳光荣** 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

【摘要】介绍了超宽带冲激无线电跳时脉冲位置调制、跳时脉冲幅度调制和直接序列超宽带三种调制方式的信号模型,重点分析和比较了三种调制信号在加性高斯白噪声信道和单频干扰下的误码率特性,并对加性高斯白噪声信道中的误码率性能进行了计算机仿真。分析与仿真结果表明,在加性高斯白噪声信道中,跳时脉冲幅度调制和直接序列超宽带的误码率性能优于跳时脉冲位置调制;超宽带冲激无线电技术在信噪比条件下还具有较好的抗干扰性能。

关键词 超宽带无线电; 扩谱通信; 跳时; 单频干扰

中图分类号 TN973.3 文献标识码 A

Performance Comparison of Ultra Wideband Impulse Radio

Yue Guangrong Li Shaoqian

(National Key Laboratory of Communication, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper introduces time-hopping pulse-position-modulation, binary time-hopping pulse-amplitude-modulation and direct sequence ultra wideband first. Then we analyze the bit error rate performances of the three Ultra Wideband radio models in additive white Gaussian noise and in the presence of single-tone jamming and the results obtained are compared by theoretic analysis and computer simulation. The simulation results show that the Ultra Wideband radio is of good performance in low SNR indeed, and the bit error rate performances of binary time-hopping pulse-amplitude-modulation and direct sequence ultra wideband schemes are better than that of time-hopping pulse-position-modulation scheme.

Key words ultra wideband radio; spread-spectrum communications; time-hopping; single-tone jamming

超宽带冲激无线电是无线通信领域的新技术,是指具有很高带宽比(射频带宽与中心频率之比)的无线电技术。应用于雷达和通信的超宽带技术的产生可回溯到上世纪60年代。文献[1,2]论证采用了冲激脉冲进行跳时调制的多址技术,开辟了将冲激脉冲作为无线电通信信息载体的新途径。

对超宽带无线电基本理论和信号特性的研究,是当前该领域的重要研究方向之一。尽管超宽带无线电技术已获得一些实际应用,但其基本理论还有待进一步完善,尤其是对超宽带无线电信号的深入认识、系统性能分析和工程技术实现方面,还有大量的工作要做^[3]。

本文将讨论基于跳时脉冲位置调制(Time-Hopping Pulse-Position-Modulation, TH-PPM)、跳时脉冲位置调制(Time-Hopping Pulse-Amplitude-Modulation, TH-PAM)和直接序列超宽带(Direct Sequence Ultra Wideband, DS-UWB)三种调制方式的信号模型,讨论中仅考虑二进制系统。

2003年8月29日收稿

* 国家自然科学基金资助项目,编号:60272083;国家863计划资助项目,编号:2003AA123250

** 男 29岁 博士生 主要从事超宽带无线通信方面的研究

1 典型超宽带无线电信号在AWGN信道中的误码率分析

1.1 信号波形介绍

TH-PPM模型是典型的超宽带无线电信号模型, 其发送波形的数学表达式为

$$S^{(k)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} W(t - jt_f - C_j^{(k)} t_c - \zeta d_{[j/N_s]}^{(k)}) \quad (1)$$

式中 $W(t)$ 是发送的单周期脉冲, w_b 为持续时间; k 为多用户系统中第 k 个用户; t_f 为脉冲重复周期; $w_b \ll t_f$; $d_j^{(k)} \in \{0,1\}$ 为二进制信息符号; ζ 是由信息序列控制的发射脉冲时延, 每 N_s 个单周期脉冲波形传送一个二进制符号, “[] ”表示取整运算; $C_j^{(k)} t_c$ 是由伪随机(Pseudo-Noise, PN)码控制的发射脉冲时延, $jt_f + C_j^{(k)} t_c + \delta d_{[j/N_s]}^{(k)}$ 表示了所发射的脉冲串中第 j 个脉冲的起点, $C_j^{(k)} = C_{j+N_p}^{(k)}$ 为第 k 用户PN码的第 j 个码元, i 为PN码的第 i 个重复周期, $0 < C_j^{(k)} \leq N_h$, PN码周期为 N_p 。设 E_p 为归一化单周期脉冲的能量, 每个信息符号的信号能量为 $E_{\text{bit}} = N_s E_p$, 单周期脉冲带宽为 $W_c \approx 1/w_b$, 每个信息符号的持续时间为 $T_{\text{bit}} = N_s t_f$, 信息速率为 $R_b = 1/T_{\text{bit}}$ 。选择形式为

$$W(t) = 2\sqrt{e} A \pi t f_c e^{-2(\pi t f_c)^2} \quad (2)$$

的单周期脉冲, 调制信号频谱衰减快、无旁瓣, 功率谱平滑, 是超宽带无线电的研究中广泛采用的波形。

TH-PAM是超宽带无线电信号的另一种典型波形, 其发送波形的数学表达式为

$$S_{\text{PAM}}^{(k)}(t) = \sum_j e_{[j/N_s]}^{(k)} W(t - jt_f - C_j^{(k)} t_c) \quad (3)$$

式中 $e_j^{(k)}$ 表示将传输的二进制符号“0”、“1”序列对应到“-1”、“+1”序列。其他有关符号的说明同PPM信号模型。TH-PAM与TH-PPM的主要差别在于, 前者用信息符号控制脉冲幅度, 后者用信息符号控制发射信号的时延。

DS-UWB信号模型是超宽带无线电的另一种信号模型, 其发送波形的数学表达式为

$$S_{\text{DS-UWB}}^{(k)}(t) = \sum_j b_j^{(k)} W(t - jt_f) \quad (4)$$

式中 $b_j^{(k)}$ 是将序列 $a_j^{(k)}$ 的二进制符号“0”、“1”序列对应到符号“-1”、“+1”序列, 其中 $a_j^{(k)} = (d_{[j/N_s]}^{(k)} + g_j^{(k)}) \bmod(2)$ 。与TH-PPM和TH-PAM方式不同的是: 伪随机码元素 $g_j^{(k)} \in \{0,1\}$ 。

1.2 误码率分析

对接收信号 $r(t)$ 采取相关解调。为简化分析, 假设仅考虑为单用户 k 且信号已同步。则

$$r(t) = AS^{(k)}(t) + n(t) \quad (5)$$

式中 $n(t)$ 是双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的高斯白噪声, A 为信号幅度的衰减。

由于采用脉冲位置调制, 相关解调又有自身的特点, 其标准假设检验过程为^[4]

$$H_d: r(t) = AW_{\text{bit}}(t - \zeta d) + n(t) \quad (6)$$

$$H_0: \text{发“0”}; H_1: \text{发“1”}$$

式中 $W_{\text{bit}}(t)$ 为一个二进制信息符号持续时间内信号波形。

$$W_{\text{bit}}(t) = \sum_{j=i \cdot N_s}^{(i+1) \cdot N_s - 1} W(t - jt_f - C_j^{(k)} t_c) \quad (7)$$

$$V_{\text{bit}}(t) = W_{\text{bit}}(t) - W_{\text{bit}}(t - \zeta) \quad (8)$$

式(8)为解调模板信号。

调制信号的最佳接收器就是具有信息符号持续时间的相关器。最佳判决原则如下

$$H_0 \text{ 为真: } \Leftrightarrow \int_{t \in \tau_i} r(t) V_{\text{bit}}(t) dt \geq 0 \quad (9)$$

$$H_1 \text{ 为真: } \Leftrightarrow \int_{t \in \tau_i} r(t) V_{\text{bit}}(t) dt < 0 \quad (10)$$

式中 τ_i 为第 i 个符号的持续时间。

假设系统中有1个用户, 但接收机希望接收第一个用户信号, 又假设以等概率发送二进制信息符号“0”, “1”, 则解调误码率为

$$P_{error} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{S_{out}(1)}}^{\infty} e^{-x^2/2} dx \tag{11}$$

$$S_{out}(1) = E_{bit}(1 - \rho) / N_0 \tag{12}$$

$$\rho = \int_{-\infty}^{\infty} W(t)W(t - \zeta)dt / \int_{-\infty}^{\infty} W^2(t)dt \tag{13}$$

为TH-PPM系统发信息符号“0”和发信息符号“1”的两种脉冲的互相关系数。

由以上分析可知,在给定噪声功率谱密度的前提下,降低发信息符号“0”和发信息符号“1”的脉冲的互相关性是提高系统抗噪声性能的有效途径,虽然在脉冲位置调制中不能得到 $\rho = -1$,但调整 ζ 可使 $\rho < 0$,从而获得了更好的抗噪声性能。

对TH-PAM信号采取相关解调,采用类似于TH-PPM信号模型的性能分析。对于TH-PAM模型,发射不同符号所用的脉冲的互相关系数 $\rho = -1$ 。对于单用户系统,误码率公式同式(11),不同的是

$$S_{out}(1) = 2E_{bit} / N_0 \tag{14}$$

DS-UWB信号模型的性能分析同TH-PAM信号模型,单用户的误码率可用式(11)、式(14)给出。

利用Matlab仿真工具对三种超宽带冲激无线电信号在AWGN信道中的误码率性能进行了仿真,其仿真结果如图1所示。从图中可知,在仅有高斯白噪声的情况下,系统误码率随着SNR的增加迅速下降,采用不同信号模型的超宽带无线电系统的抗噪声性能不同,TH-PAM与DS-UWB两种超宽带信号模型的抗噪声性能要比TH-PPM模型好。

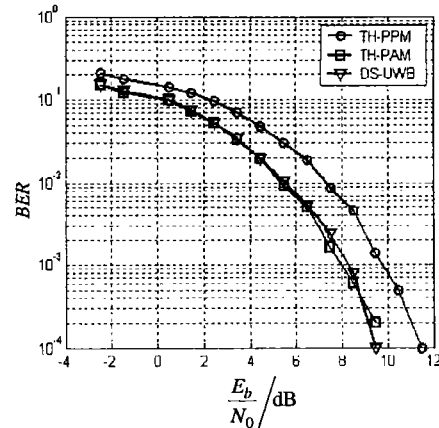


图1 三种信号模型误码率仿真结果

2 单频干扰下的误码率分析

2.1 TH-PPM信号在单频干扰下的误码率

假设系统仅有单用户且在通带内有一幅度为 a , 频率为 f_j 的正弦干扰为

$$n_j(t) = a \cos(2\pi f_j t) \tag{15}$$

接收信号模型为

$$r(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} W(t - jt_f - C_j^{(1)}t_c - \zeta d_{(j/N_s)}^{(1)}) + n_j(t) \tag{16}$$

干扰信号的功率为 $J = a^2/2$, 则 $n_j(t)$ 的双边功率谱 $G_j(f)$ 为

$$G_j(f) = \frac{J}{2} \delta(f - f_j) + \frac{J}{2} \delta(f + f_j) \tag{17}$$

假设解调模板信号中由伪随机码控制的各周期中脉冲起点位置为 p_1, p_2, \dots, p_n , $p_i = C_i^{(1)}t_c + (i-1)t_f$, $i = 1, 2, \dots$, 则相关器的传输函数的模为

$$|H(f)| = \left| 2 \sin(\pi f \zeta) F(f) \left(e^{-j2\pi f p_1} + e^{-j2\pi f p_2} + \dots + e^{-j2\pi f p_n} \right) \right| \tag{18}$$

解调后输出的干扰信号的功率为

$$P_j = 4J \sin^2(\pi f_j \zeta) |F(f_j)|^2 \left| \left(e^{-j2\pi f_j p_1} + e^{-j2\pi f_j p_2} + \dots + e^{-j2\pi f_j p_n} \right) \right|^2 \tag{19}$$

而信号解调输出功率为

$$P_s = E_p^2 (1 - \rho)^2 N_s^2 \tag{20}$$

可得TH-PPM解调输出信干比为

$$SIR = \frac{E_p^2 (1 - \rho)^2 N_s^2}{2a^2 \sin^2(\pi f_j \zeta) |F(f_j)|^2 \left| \left(e^{-j2\pi f_j p_1} + e^{-j2\pi f_j p_2} + \dots + e^{-j2\pi f_j p_n} \right) \right|^2} \tag{21}$$

系统误码率为

$$P_{error} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{SIR}}^{\infty} e^{-x^2/2} dx \quad (22)$$

系统采用周期等于 N_s 的伪随机码调制: 系统的抗干扰能力要比不采用伪随机码的系统有极大的提高, ζ 和伪随机码一旦固定, 使解调输出最大干扰功率的干扰频率固定, 可能被干扰方捕获到最佳干扰频率, 此时 $H(f)$ 没有明显的梳状幅度谱, 即使干扰频率有些偏移, 但干扰的效果下降比不采用伪随机码的系统要小。

系统采用周期远大于 N_s 的伪随机码调制: 由于采用了较长周期的伪随机码, 已调信号平均功率可到毫瓦级甚至更低, 数十米以外难以被检测; $H(f)$ 的功率谱峰值较不采用伪随机码调制时低得多, 此时, 传输不同信息比特信号的功率谱峰值所对应的频率(这一频率为最佳干扰频率)不同, 干扰方的干扰频率难以跟上最佳干扰频率的变化, 因此, 提高了系统的抗正弦干扰能力。

除 ζ 参数外, 以上分析TH-PPM的参数选择方法同样可适用TH-PAM。

2.2 TH-PAM在单频干扰下的误码率

与TH-PPM调制相比, TH-PAM调制没有参数 ζ 的选择, 除此之外, 脉冲的波形和伪随机码的选择方面, 两种调制方式几乎没有区别。因此, 两种调制方式在抗干扰分析方面, 具有很多相同之处。

TH-PAM解调输出信干比为

$$SIR = \frac{E_p^2 N_s^2}{J|F(f_j)|^2 \left(e^{-j2\pi f_j p_1} + e^{-j2\pi f_j p_2} + \dots + e^{-j2\pi f_j p_{N_s}} \right)^2} \quad (23)$$

TH-PAM系统的误码率公式同式(22)。

2.3 DS-UWB调制信号抗干扰分析

在一个信息比特持续时间内相关器的传输函数的模为

$$|H(f)| = \left| F(f) \left(g_0 + g_1 e^{-j2\pi f T_c} + \dots + g_{N_s-1} e^{-j2\pi f (N_s-1) T_c} \right) \right| \quad (24)$$

当存在单频正弦干扰时, 经相关器输出干扰信号的功率为

$$P_j = J|F(f_j)|^2 \left(g_0 + g_1 e^{-j2\pi f_j T_c} + \dots + g_{N_s-1} e^{-j2\pi f_j (N_s-1) T_c} \right)^2 \quad (25)$$

DS-UWB解调输出信干比为

$$SIR = \frac{E_p^2 N_s^2}{J|F(f_j)|^2 \left(g_0 + g_1 e^{-j2\pi f_j T_c} + \dots + g_{N_s-1} e^{-j2\pi f_j (N_s-1) T_c} \right)^2} \quad (26)$$

DS-UWB系统的误码率式(26)同式(22)。

3 结束语

本文分析了基于TH-PPM、TH-PAM和DS-UWB三种调制方式的信号模型, 并对三种调制信号在AWGN信道和单频干扰下的误码率特性进行了分析和比较。尤其是抗单频干扰的理论分析结果为提高三种信号的抗干扰性能提供了系统参数选择的依据。

参 考 文 献

- [1] Scholtz R A. Multiple access with time-hopping impulse modulation[C]. invited paper, Proceedings of Milcom'93, Bedford Dec. 1993. 447-450
- [2] Win M Z, Scholtz R A. Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless Multiple-access communications[J]. IEEE Trans on Communications, 2000, 48(4): 679-690
- [3] 岳光荣, 葛利嘉. 超宽带无线电综述[J]. 解放军理工大学学报, 2002, 3(2): 14-19
- [4] Ziemer R E, Peterson R L. Digital Communications and Spread Spectrum Systems[M]. New York: Macmillan Publishing Company, 1985