

基于随机脉冲干扰的超宽带通信系统性能分析

黄志清^{1,2}, 王卫东²

(1. 镇江船艇学院 指挥系, 江苏 镇江 212003; 2. 中国科技大学 信息科学技术学院, 合肥 230027)

摘 要: 基于忽略背景热噪声影响的前提, 建立了随机脉冲干扰模型和调时-二相调制超宽带 (TH-BPM-UWB) 通信系统模型. 对软判决检测方式和硬判决检测方式分别作了研究, 确定出脉冲参数、跳时码参数与超宽带通信系统抗干扰性能之间的关系. 理论分析和实验仿真表明: 软判决的性能并不总是优于硬判决; 当多脉冲接收机采用软判决且信干比较小时, 其性能反而不如单脉冲接收机; 跳时码调制对随机脉冲干扰的影响很小.

关键词: 超宽带; 随机脉冲干扰; 软判决; 硬判决; 性能仿真

中图分类号: TN973.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2013)01-0066-04

Performance analysis of UWB communication system based on random pulse jamming

HUANG Zhi-qing^{1,2}, WANG Wei-dong²

(1. Department of Commandment, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212003, China; 2. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Random pulse jamming model and TH-BPM (Time Hopping-Binary Phase Data Modulation) UWB communication system model were established with the background noise being neglected. Soft decision detection and hard decision detection were studied respectively, and the relation between anti-jamming performance and two parameters of pulse and TH code was found. Both theoretical analysis and simulation results show that the performance of soft decision is not always better than hard decision, the performance of multi-pulses receiver is actually not as good as mono-pulse receiver when soft decision is applied with low SJR, and TH code has a slight impact on random pulse jamming.

Key words: ultra wide band; random pulse jamming; soft decision; hard decision; performance simulation

基于脉冲的超宽带 (ultra wide band, UWB) 通信技术, 又称为脉冲无线电 (impulse radio, IR), 具有低检测概率和低截获概率特性好、系统复杂度低、耗电量小、速率高、抗多径能力强、定位准确度高等优点, 在军事和民用领域都有广阔的应用前景^[1-4]. 由于 UWB 信号的宽带效应, 其会干扰其他现有无线通信系统, 文献 [3-6] 研究了 UWB 通信系统与 WLAN、CDMA、GSM 和 GPS 等的共存性. 在干扰现有无线通信系统的同时, UWB 通信系统也会受到各种干扰的威胁, 对 UWB 抗各种干扰的能力进行分析, 是超宽带通信研究领域面临的重要课题, 尤其是在军事领域. 文献 [7] 分析了

TH-IR 在音频干扰下的性能, 并与直接序列扩频技术进行了比较, 但其没有考虑到跳时码的影响. 文献 [8] 分析了 MB-OFDM (多频带正交频分复用) 的抗音频干扰、部分频带干扰、宽带干扰的性能. 脉冲干扰是战场环境中较为常见的人为干扰样式, 是利用干扰机发射一系列脉冲信号或类似于被干扰设备的脉冲信号而形成的干扰. 这种干扰作用时间短、脉冲功率大, 通常用于干扰脉冲信号通信 (如 UWB 通信). 因此, 对 UWB 通信系统抗脉冲干扰性能进行分析具有重要的现实意义, 但目前这方面的研究还很少. 文献 [9] 针对 TH-PPM (time hopping-pulse position modulation) 超宽

收稿日期: 2012-08-30 基金项目: 中国科学院知识创新工程重大方向性项目 (KG CX2-WY-415-2)

第一作者: 黄志清 (1978—), 男, 硕士研究生, 讲师.

通信作者: 王卫东 (1967—), 男, 教授, 博士生导师. E-mail: wdwang@ustc.edu.cn

带体制,分析了不同参数的脉冲干扰信号对该通信体制的影响,运用 Matlab 进行仿真并给出了结果.文献[10]分析了 MB-OFDM 超宽带体制在不同的信道环境下对抗信道噪声和干扰(脉冲干扰、宽带干扰、部分频带干扰)的不同性能,并进行了实验仿真.文献[9-10]都仅给出了仿真结果,没有理论结果进行互相验证,对不同的接收方式没有进行比较,而且没有考虑跳时码的影响.本文针对 TH-BPM (time hopping-binary phase data modulation)超宽带体制进行了分析,建立了随机脉冲干扰和 UWB 通信系统模型,考虑多脉冲跳时码影响,分别对软判决接收和硬判决接收方式下系统的误码率进行了严密的推导并给出了表达式,对不同的判决方式进行了比较分析,并借助 Matlab 软件进行了仿真验证,为超宽带通信系统的实际应用提供了重要依据.

1 随机脉冲干扰模型

通信侦察是实施通信干扰的前提,下面对 UWB 通信系统抗干扰性能的分析都是在假定干扰机已经获知 UWB 信号相关参数的基础上进行的.假定干扰机侦察到 UWB 信号的带宽(W_s)、脉冲宽度(T_p)、帧长(T_f)等参数后,每个 T_f 内随机发一个干扰脉冲,为了分析方便令干扰的持续时间 $\tau = T_p$,干扰功率(P_j)在整个信号带宽内均匀施加.

对信号脉冲来说,在某个 T_f 内干扰脉冲何时出现是完全随机的,即在 $(kT_f, (k+1)T_f)$ 内有干扰存在的时刻 X 是一个服从均匀分布的连续型随机变量, X 的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{T_f} \quad (1)$$

为了便于进行理论分析,假设每个信号脉冲要么全部受到干扰,要么不受到干扰,即不考虑干扰脉冲和信号脉冲发生部分碰撞的情况.若某个 T_f 内信号脉冲的起始时刻为 t ,因为干扰的持续时间 $\tau = T_p$,信号脉冲和干扰脉冲完全碰撞,也就意味着 X 全部落在 $(t, t+T_p)$ 内, X 落在 $(t, t+T_p)$ 内的概率为:

$$\left. \begin{aligned} P\{t < X < t+T_p\} &= \int_t^{t+T_p} \frac{1}{T_f} dx = \frac{T_p}{T_f} = \rho \\ kT_f < t < t+T_p < (k+1)T_f \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

因为人为干扰产生的功率通常远大于背景热噪声,所以可忽略背景热噪声的影响.当无干扰出现时,系统的误码率为零;当有干扰出现时,可以将其看作是均值为零、瞬时功率为 $P_j\rho$ 的高斯白噪声.

2 UWB 通信系统模型

考虑二进制通信系统,以跳时-二相调制 (TH-BPM)为例,仅研究单用户超宽带通信方式,接收端采用相关接收并假定没有同步误差.假设忽略信号传输过程中时延的影响,接收到的信号为:

$$r(t) = s(t) + J(t) \quad (3)$$

式中: $s(t)$ 是有用信号; $J(t)$ 为干扰信号. $s(t)$ 与 $J(t)$ 是统计独立的.有用信号的时域表达式为:

$$s(t) = \sqrt{E_p} \sum_j d_{[j/N_s]} W(t - jT_f - C_j T_c) \quad (4)$$

式中: E_p 为单脉冲携带的能量; $W(t)$ 是基本脉冲经过能量归一化之后的波形; C_j 为用户跳时序列的第 j 个码元; T_c 是由跳时序列控制的单位发射脉冲时延; $d_j \in \{-1, 1\}$ 表示发送的数据比特;“ $[]$ ”表示取整运算,每 N_s 个脉冲表示 1 个比特^[11].

3 UWB 通信系统抗随机脉冲干扰性能分析

3.1 无跳时码调制时 UWB 通信系统抗干扰性能分析

首先研究在没有跳时码调制的情况下,UWB 通信系统抗随机脉冲干扰的性能,分别分析硬判决检测 (hard decision)和软判决检测 (soft decision)的性能并进行比较.

3.1.1 硬判决检测

当采用硬判决检测时,接收机对 N_s 个脉冲进行 N_s 次独立的检测判决,然后送到合并器,最终的判决结果根据大数判决定律得到.由于干扰脉冲在每个 T_f 内都是随机出现的,因此 N_s 个信号脉冲中每个脉冲受到干扰的概率是相同的,即 $P(\text{jammed}) = \rho$.单个脉冲信号受到干扰时,相当于在信号上叠加了一个是均值为零、方差为 $N_j/2\rho$ ($N_j = P_j/W_s$)的高斯随机变量,接收机接收到的是均值为 $\pm\sqrt{E_p}$ (发 1 时为 $\sqrt{E_p}$,发 -1 时为 $-\sqrt{E_p}$)、方差为 $N_j/2\rho$ 的高斯随机变量.假定发 1 和 -1 的先验概率是相等的,则单脉冲受干扰时的错判概率为:

$$P_e = \rho Q\left(\sqrt{\frac{2E_p\rho}{N_j}}\right) \quad (5)$$

假设信道是无记忆的, N_s 个脉冲中每个脉冲受到干扰的事件是相互独立的,当 N_s 为奇数时系统总的误码率为:

$$P_{\text{ch}} = \sum_{i=\frac{N_s+1}{2}}^{N_s} C_{N_s}^i P_e^i (1-P_e)^{N_s-i} \quad (6)$$

当 N_s 为偶数时,有 $(\frac{N_s}{2} + 1)$ 个以上的脉冲被误判时,最终判决的比特肯定是错误的;有 $\frac{N_s}{2}$ 个脉冲被误判时,最终判决的比特可能是正确的也可能是错误的.系统总的误码率为:

$$P_{eh} = \sum_{i=\frac{N_s}{2}+1}^{N_s} C_{N_s}^i P_e^i (1 - P_e)^{N_s-i} + \frac{1}{2} C_{N_s}^{\frac{N_s}{2}} P_e^{\frac{N_s}{2}} (1 - P_e)^{\frac{N_s}{2}} \quad (7)$$

(6)、(7)式合并表示为:

$$P_{eh} = \sum_{i=\lceil \frac{N_s+1}{2} \rceil}^{N_s} C_{N_s}^i P_e^i (1 - P_e)^{N_s-i} + \frac{1}{2} \chi C_{N_s}^{\frac{N_s}{2}} P_e^{\frac{N_s}{2}} (1 - P_e)^{\frac{N_s}{2}} \quad (8)$$

式中:“ $\lceil \cdot \rceil$ ”为取整运算;“ $\lceil \frac{N_s+1}{2} \rceil$ ”表示大于等于 $\frac{N_s+1}{2}$ 的最小整数;当 N_s 为偶数时, $\chi=1$;当 N_s 为奇数时, $\chi=0$.

3.1.2 软判决检测

采用软判决检测时,接收机将 N_s 个脉冲形成的信号当作一个单独的多脉冲信号. 到达接收机的 N_s 个信号脉冲有 k (k 是整数, $0 \leq k \leq N_s$) 个受到干扰,由概率论的知识可知进入合并器的是均值为 $\pm N_s \sqrt{E_p}$ (发 1 时为 $N_s \sqrt{E_p}$, 发 -1 时为 $-N_s \sqrt{E_p}$)、方差为 $kN_J/2\rho$ 的高斯随机变量. 当分别发 1 和 -1 时,假定先验概率 $P(H_1) = P(H_{-1}) = 1/2$, 随机变量 r 的概率密度函数分别为:

$$f(r|H_{-1}) = \frac{1}{\sqrt{\pi k N_J / \rho}} \exp \left\{ -\frac{(r + N_s \sqrt{E_p})^2}{k N_J / \rho} \right\} \quad (9)$$

$$f(r|H_1) = \frac{1}{\sqrt{\pi k N_J / \rho}} \exp \left\{ -\frac{(r - N_s \sqrt{E_p})^2}{k N_J / \rho} \right\} \quad (10)$$

判决门限为 0, 则 N_s 个信号脉冲中有 k 个脉冲受到干扰时的错误概率为:

$$P(\text{error}|k \text{ jammed}) = P(H_{-1}) \int_0^{\infty} f(r|H_{-1}) dr + P(H_1) \int_{-\infty}^0 f(r|H_1) dr \quad (11)$$

因为 $\int_0^{\infty} f(r|H_{-1}) dr = \int_{-\infty}^0 f(r|H_1) dr$, 所以错误概率为:

$$P(\text{error}|k \text{ jammed}) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi k N_J / \rho}} \exp \left\{ -\frac{(r + N_s \sqrt{E_p})^2}{k N_J / \rho} \right\} dr \quad (12)$$

进行变量代换,令 $x = \frac{(r + N_s \sqrt{E_p})}{\sqrt{k N_J / 2\rho}}$, 得:

$$P(\text{error}|k \text{ jammed}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{2E_p N_s^2 \rho / k N_J}}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2} \right\} dx = Q \left(\sqrt{2E_p N_s^2 \rho / k N_J} \right) \quad (13)$$

每个脉冲受到干扰的事件是独立的且概率都为 ρ , N_s 个脉冲中有 k 个脉冲受到干扰的概率为:

$$P(k \text{ jammed}) = C_{N_s}^k \rho^k (1 - \rho)^{N_s-k} \quad (14)$$

k 个脉冲受到干扰时的误码率为:

$$P(\text{error}|k \text{ jammed})(k \text{ jammed}) = C_{N_s}^k \rho^k (1 - \rho)^{N_s-k} Q \left(\sqrt{2E_p N_s^2 \rho / k N_J} \right) \quad (15)$$

k 的取值为: 1, 2, 3, N_s , 所以软判决时系统的平均误码率为:

$$P_{es} = \sum_{k=1}^{N_s} C_{N_s}^k \rho^k (1 - \rho)^{N_s-k} Q \left(\sqrt{2E_p N_s^2 \rho / k N_J} \right) \quad (16)$$

3.2 有跳时码调制时 UWB 通信系统抗干扰性能分析

跳时序列 C_j 是一个码长为 N_p 的 N_h (码元的取值范围)元序列,其只是改变了信号脉冲在每个帧长内的出现时刻, 对于一个特定的超宽带通信系统来说,跳时序列是确定的. 因为脉冲干扰是随机的, 所以与无跳时码调制时相比,有跳时码调制时每个信号脉冲受干扰的概率并没有改变,多个信号脉冲受干扰的概率与无跳时码调制时也是一样的,跳时码调制对超宽带通信系统抗随机脉冲干扰性能的提高是没有贡献的.

4 UWB 通信系统抗随机脉冲干扰性能仿真

4.1 仿真条件及参数

采用 Matlab7.1 软件进行仿真, 调制方式为 TH-BPM, 假定跳时码的码长 $N_p = N_s$, 信号脉冲为二阶高斯波形, $T_p = 0.5 \text{ ns}$, $T_r = 5 \text{ ns}$, $T_c = 0.5 \text{ ns}$. 仿真时取样间隔为 dt , 总的发射脉冲数目 $\text{numpulses} = N_s * \text{numbits}$. 首先用 `randn` 函数产生一个长度为 $(\text{numpulses} * T_r) / dt$ 的高斯白噪声序列, 然后用 `rand` 函数产生一个随机数, 在这个随机数控制下从高斯白噪声序列中每间隔 T_r / dt 个点从 T_r / dt 中随机连续取 T_p / dt 个样本点得到随机脉冲干扰序列, 随机脉冲干扰的功率由高斯白噪声的方差控制.

4.2 仿真结果及分析

4.2.1 无跳时码调制时 UWB 通信系统的抗干扰性能

图 1 给出了 $\rho = 0.1$ 时, UWB 通信系统在随机脉

冲干扰下的软硬判决性能曲线,从图 1 可以看出理论推导与仿真实验非常吻合。

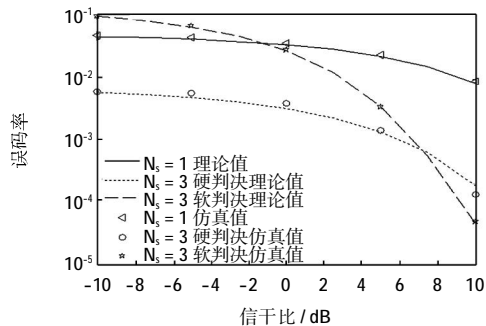


图 1 UWB 系统在随机脉冲干扰下的性能

Fig.1 Performance of UWB system under random pulse jamming

从图 1 可以看出软判决的性能并不总是优于硬判决,当信干比小于 7 dB(干扰功率较大)时,硬判决的性能反而优于软判决.其原因是 N_s 个脉冲中被干扰的脉冲个数是随机的,当被干扰的脉冲数目较少但干扰情况又很严重时,软判决可能使比特判决出错;而采用硬判决时只有被严重干扰的少数脉冲判决会出错,但在而后的的大数判决时比特仍有可能被正确判决。

由图 1 还可以看出,当多脉冲接收机采用硬判决时,性能比单脉冲时有很大的改善;但是当采用软判决时,在信干比小于 -1 dB 时,其性能反而不如单脉冲接收机.原因是用多个脉冲表示 1 个比特时,虽然接收端信号功率增大了,但是信号脉冲被干扰的概率也增大了,当干扰功率很大时,接收端的信干比反而下降了。

4.2.2 有跳时码调制时 UWB 通信系统的抗干扰性能

图 2 给出了有跳时码调制时 UWB 通信系统性能的仿真曲线,并和无跳时码调制时的性能进行了比较。

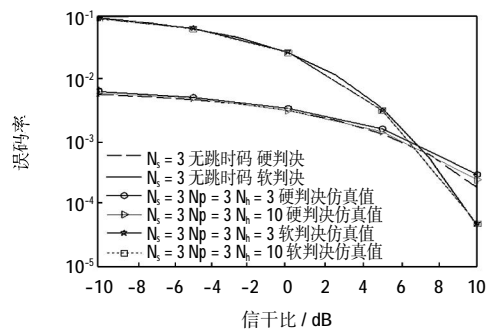


图 2 有跳时码时系统受随机脉冲干扰时的性能

Fig.2 Performance of UWB system modulated by TH code under random pulse jamming

由图 2 可以看出,无论是硬判决接收方式还是软判决接收方式,采用跳时码调制后系统的性能与无跳时码调制时相差都很小,与前面的理论分析是一致的。

5 结 论

本文研究了超宽带通信系统抗随机脉冲干扰的性能,对软判决接收方式和硬判决接收方式,单脉冲接收机和多脉冲接收机,有跳时码和无跳时码时的系统性能进行了分析比较.理论分析与仿真实验的吻合度好,所得结论一致:软判决的性能并不总是优于硬判决;当多脉冲接收机采用软判决且信干比较小时,其性能反而不如单脉冲接收机;跳时码调制对随机脉冲干扰的影响很小。

参考文献:

- [1] PERE Duenas J, WANGUEMERT Perez J G, MOLINA Fernandez I. Novel modulation scheme and six-port based RAKE receiver for DS-UWB[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7): 3628-3633.
- [2] ZENG Liaoyuan, MCGRATH Sean, CANO Eduardo. Multiuser spectral efficiency maximization in cognitive ultra wideband radio systems[C]//2010 Sixth Advanced International Conference on Telecommunications. Spain: IEEE, 2010: 118-123.
- [3] CHIANI M, GIORGETTIA. Coexistence between UWB and narrow-band wireless communication systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 231-254.
- [4] MANZI G, FELIZIANI M, BEECKMAN P A, et al. Coexistence between ultra-wideband radio and narrow-band wireless LAN communication systems [J]. IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(2): 382-390.
- [5] 齐丽娜, 干宗良, 朱洪波. 存在 CDMA 干扰时超宽带系统性能分析[J]. 微波学报, 2009, 25(3): 92-96.
- [6] 蒋磊, 王永生, 郭建新. 超宽带通信中干扰抑制方法[J]. 空军工程大学报, 2007, 8(2): 52-56.
- [7] LI Zhao. Performance of ultra-wideband communications in the presence of interference[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(9): 1684-1691.
- [8] 陈思. MB-OFDM 超宽带技术的抗干扰性能研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 121-123.
- [9] 覃振江, 王昌宝. 脉冲干扰对超宽带通信干扰效果分析研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(10): 69-72.
- [10] 侯运林. 多载波超宽带系统在干扰条件下的性能研究[J]. 无线通信技术, 2008, 17(3): 25-28.
- [11] YVES Paul Nakache. Spectral shaping of UWB signal for time-hopping impulse radio [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(4): 738-744.