

MB - UWB 系统中的干扰检测研究

蒋 磊¹, 侯 俊², 许 华¹, 郭建新¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:分析研究了 MB - UWB 通信系统的干扰检测算法。针对传统 MB - UWB 通信系统中所存在的数据传输速率的不足,提出了改进的并行 MB - UWB 的系统方案,为了获得传输数据速率的提高,该方案采用了并行体制,并对 MB - UWB 系统各子带信号的正交化进行了设计。对改进的并行 MB - UWB 通信系统进行了数学分析和描述。基于并行 MB - UWB 系统方案,进一步提出了一种新的低采样率的干扰检测算法,并对该算法的处理过程和可行性进行了数学分析和系统仿真。分析和仿真结果表明,所提新算法可在较低的采样速率上,完成对与共存干扰的有效检测,并可与改进的 MB - UWB 通信系统的干扰抑制处理相结合,明显改善共存 UWB 系统的误码率性能。

关键词:干扰抑制;超宽带;干扰检测;IEEE802.11a;脉冲极性调制

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.06.013

中图分类号: TN914.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)05-0054-06

超宽带通信技术(Ultra-Wide Band, UWB)相比传统调制技术在信息传输速率、抗多径、抗侦听和抗截获等方面具有诸多性能优势,因此对该技术的研究也迅速成为国内外近几年的研究热点,在 2002 年 FCC (Federal Communication Commission) 对其公开授权后,现已成为未来 4G 的强有力备选技术之一^[1-3]。

在 UWB 通信技术所授权使用的频段中(3.1 GHz - 10.6 GHz)^[4],存在着如 IEEE802.11a WLAN、GPS、微波着陆系统等众多现行的商用和军用通信系统。UWB 系统信号所占用的频谱不可避免地与之发生交叠,所使用频谱的冲突导致了 UWB 与共存通信系统之间互干扰问题的产生。大量文献已经表明,在满足 FCC 规定的辐射掩蔽条件下(-41.3 dBm/MHz), IEEE802.11a WLAN 信号仍然会对对共存的 UWB 通信系统产生严重干扰,反之亦然^[5-7]。因此在 UWB 系统中如何有效抑制强功率的共存干扰(Coexisting Interference, CI),成为 UWB 技术成功应用的关键。

近些年,围绕该问题,众多文献对此提出了一些解决方法。E. Baccarelli 提出了对 CI 抑制的自适应前馈回路技术^[8],然而该技术过多地依赖于干扰信号模型的假定。A. Bayesteh 等提出采用 MMSE 接收处理技术^[9],但该技术却极大地增大了 UWB 系统的处理复杂度,并需要高的采样速率。文献[10-11]提出了采用 AMRTW (Adaptive Modified Receiving Template Waveform)算法,然而其对强干扰的抑制能力是有限的。文献[12-13]提出了多带 UWB (Multi-Band UWB, MB-UWB)技术方案以及干扰检测算法,其不仅具有较低的处理复杂度,而且在强 CI 的抑制性能上有了改进,但由于该技术方案采用了时频复用技术,从而其 MB-UWB 系统的信息传输速率性能存在明显不足。鉴于此,本文为了改进时分 MB-UWB 方案的数据传输速率性能,提出了并行的 MB-UWB 调制体制,并在此基础上,提出了一种对 CI 检测的新算法。该算法可在没有任何先验干扰知识的背景下完成对干扰信号的有效检测,并具有较低的采样速率。

* 收稿日期:2009-04-21

基金项目:教育部高等学校学科点基金资助项目(200606099010);西北工业大学科技创新基金资助项目(2008KJ02025)

作者简介:蒋 磊(1974-),男,江苏无锡人,副教授,博士,主要从事 UWB 关键技术的研究。

E-mail: jleimail@126.com

1 并发 MB-UWB 系统方案

1.1 发射信号模型

采用二相脉冲极性调制的并发 MB-UWB 系统的发射信号可具体表示为:

$$S_{trans}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_{[n/N_b]} P(t - nT_f) \tag{1}$$

式中: $\alpha_{[\cdot]} \in (1, -1)$ 为信息数据, $[\cdot]$ 代表取整运算;单个信息符号的时长为 T_b , 一个信息数据符号由 N_b 个重复脉冲帧组成, T_f 为单个脉冲帧长,即 $T_b = N_b T_f$; $P(t)$ 为基本脉冲波形,不失一般性,该处采用 Gaussian 脉冲加权的正弦波形,具体表示如下^[10]:

$$P(t) = \sum_{m=1}^M \exp\left(-\frac{at^2}{\gamma}\right) \sin\phi_m t \tag{2}$$

式中: $a = \ln 10$; γ 为 Gaussian 脉冲频谱带宽控制参数; M 为并发子带脉冲的个数; ϕ_m 为第 m 个子带脉冲的载频,并具有如下关系:

$$\phi_m = 2\pi(f_L - 0.5Bw + mBw) \tag{3}$$

式中: f_L 为 FCC 辐射掩蔽规定中的低端频率^[4]; Bw 为单个子带的带宽,即 $Bw \geq 500$ MHz。该发射信号的时域波形见图 1。

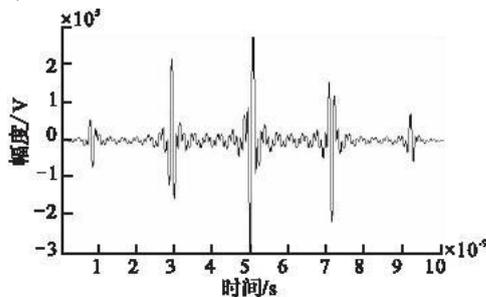


图 1 并发 MB-UWB 系统发射信号时域波形示意图

Fig. 1 The transmitting waveform of parallel MB-UWB system

从图 1 中可以看出,并发 MB-UWB 系统方案在所采用的子带脉冲时长相同的条件下,其信息数据传输速率性能明显比时分 MB-UWB 系统方案更具有优势。

1.2 接收信号模型

并发 MB-UWB 系统的接收端采用相关接收处理技术,具体构成见图 2。

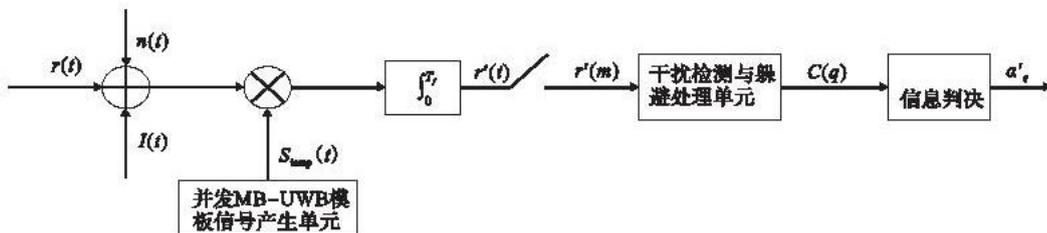


图 2 并发 MB-UWB 系统的接收原理示意图

Fig. 2 The receiving scheme of parallel MB-UWB system

MB-UWB 接收机所接收的信号 $S_{rec}(t)$ 可表示为:

$$S_{rec}(t) = r(t) + n(t) + I(t) \tag{4}$$

式中: $n(t)$ 为信道中引入的高斯白噪声; $I(t)$ 为与 MB-UWB 系统共存的干扰信号; $r(t)$ 为接收的有用信号,具体描述如下:

$$r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \lambda \alpha_{[n/N_b]} P(t - nT_f - \Delta) \tag{5}$$

式中: λ 为信道中引入的对有用信号的衰减系数; Δ 为信道中引入的信号延迟。接收信号经过相关处理后(与本地并发 MB-UWB 模板信号 $S_{temp}(t)$ 进行相关处理)得到 $r'(t)$, 经定时采样后的第 m 个检测量可表示为:

$$r'(m) = \int_{(m-1)T_f}^{mT_f} S_{rec}(t) S_{temp}(t) dt \tag{6}$$

不失一般性,设 MB-UWB 接收机对所接收信号已经获得理想的同步,即 $\Delta = 0$, 则对信息数据的恢复可根据式(6) 进行判决,可进一步表示如下:

$$\alpha'_q = \text{sign}\left(\sum_{m=1}^M \lambda \alpha_q P[t - (q-1)N_b T_f - mT_f] + n(t) + I(t)\right) \cdot S_{temp}[t - (q-1)N_b T_f - mT_f] \tag{7}$$

式中 $S_{\text{temp}}(t) = P(t)$ 与发射端 T_f 内的发射波形相同。

1.3 并发 MB-UWB 系统子带的正交化

在并行 MB-UWB 系统接收端,信息的有效恢复是靠本地模板信号与发送信号的相关运算来完成的。参考式(7),可以发现,在 MB-UWB 接收系统的相关处理中,并发子带脉冲之间的相关性可导致对信息结果的错误判决。因此,削弱并行 MB-UWB 系统脉冲信号中多个并发子带脉冲之间的相关性是该方案中必须考虑的问题。本文考虑采用 Gram-Schmidt 标准正交化算法对各并发子带脉冲进行弱相关性处理。具体分析描述如下:

设 MB-UWB 脉冲信号中各并发子带脉冲波形函数为 $\rho_i (i=1,2,\dots,M)$, 表示为:

$$\rho_i = \exp\left(-\frac{at^2}{\gamma^2}\right) \sin\phi_i t, \quad i=1,2,\dots,M \quad (8)$$

令 $\chi_0 = \rho_1$, 则 $\chi_k = \rho_k - \sum_{\mu=1}^{k-1} \xi_{k,\mu} \rho_\mu$, 其中: $\xi_{k,\mu} = \frac{\langle \rho_k, \chi_\mu \rangle}{\langle \chi_\mu, \chi_\mu \rangle}$, $k \geq 2, \mu=1,2,\dots,k-1$

$$\langle f_1(x), f_2(x) \rangle \triangleq \int_a^b f_1(x) f_2^*(x) dx \quad x \in [a, b]$$

正交化后最终各并发子带脉冲调整为:

$$\rho'_i = \frac{\chi_k}{\|\chi_k\|}, \quad \forall k=1,2,\dots,M \quad (9)$$

通过上述正交化处理,显著地削弱了式(7)中各子带脉冲之间的相关性,从而影响信息符号判决的主要因素中克服了来自多子带之间的相关干扰而主要集中在了 $n(t)$ 和 $I(t)$ 上。

2 干扰检测算法

2.1 并发子带干扰检测算法的提出

由于 CI 的存在严重威胁着 UWB 系统的性能^[5-6],因此在 UWB 系统接收端如何对 CI 进行有效抑制成为了 UWB 系统中的一个重要研究内容。本文所提出的并发 MB-UWB 调制方案可通过灵活的子带脉冲处理对 CI 进行有效抑制,可采用的处理方式有:①发端关闭某些与 CI 冲突的子带脉冲,从而对 UWB 系统与共存窄带系统之间的互干扰进行有效抑制^[12];②MB-UWB 系统接收端本地相关接收模板信号扣除若干冲突子带脉冲来对 CI 进行抑制^[10];③从 MB-UWB 系统接收端通过相关处理后的结果中扣除 CI 存在的子带脉冲相关处理结果来抑制 CI 对 MB-UWB 系统的干扰。上述 3 种处理方式中都需要对信道中存在的 CI 进行有效地检测。借助于数字信号处理技术的干扰检测方法,由于要对 MB-UWB 系统信号进行高速采样,因此需要同时满足高达几 GHz 的采样速率和较高的分辨率,这对现今的 AD 器件来说基本上是不可实现的^[13]。鉴于此,本文针对并发 MB-UWB 调制方案提出了一种可行的 CI 检测算法。该算法显著地降低了对 AD 采样速率的要求,保证了对并发 MB-UWB 系统中 CI 有效抑制的实现。

2.2 并发子带干扰检测算法的数学分析

以第 3 种子带脉冲处理方法为研究对象。显然在 MB-UWB 接收相关器前对 MB-UWB 信号进行 AD 采样,采样速率必须满足奈奎斯特采样定理的要求,这必然会使采样速率高达几 GHz。因此本文考虑在 UWB 接收相关器后进行采样,于是可将图 2 的结构具体细化描述见图 3。

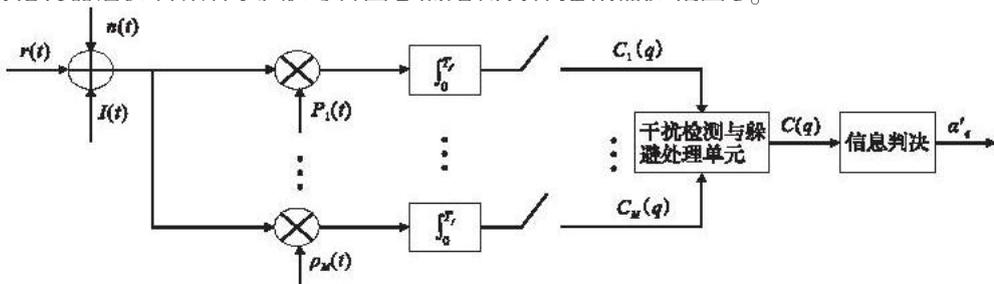


图 3 并发 MB-UWB 相关接收原理示意图

Fig. 3 The correlating receiving disposing scheme of parallel MB-UWB system

从图3可以看出,第*i*路相关器第*q*个时刻采样输出 $C_i(q)$ 可表示为(采样频率为 $1/T_f$):

$$C_i(q) = \int_0^{T_f} (r(t) + n(t) + I(t)) \rho_i(t - (q-1)T_f) dt \quad (10)$$

由于对MB-UWB的信号进行了正交化处理,从而使各子带脉冲完全正交,因此式(10)可简化为:

$$C_i(q) = \int_0^{T_f} \lambda_q \rho_i^2(t - (q-1)T_f) dt + \int_0^{T_f} (n(t) + I(t)) \rho_i(t - (q-1)T_f) dt \quad (11)$$

若此时信道中存在CI为 $I(t)$,且该干扰的频段落在第*k*个子带频段内,暂不考虑 $n(t)$,则上式可进一步推导为:

$$C_i(q) \begin{cases} \approx \int_0^{T_f} \lambda_q \rho_i^2(t - (q-1)T_f) dt, & k \neq i \\ = \int_0^{T_f} \lambda_q \rho_i^2(t - (q-1)T_f) dt + \int_0^{T_f} I(t) \rho_i(t - (q-1)T_f) dt, & k = i \end{cases} \quad (12)$$

从式(12)可明显看出,当 $I(t)$ 落入到某个子带脉冲频段内时,所击中子带脉冲的本地相关处理结果中会明显存在 $I(t)$ 的影响;而其它未冲突的子带脉冲的相关处理结果却未受影响。因此可构造如下的算子 ψ_i 来检测干扰在第*i*个子带中是否存在。

$$\psi_i = \frac{\text{var}\{C_i(q)\}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{var}\{C_i(q)\} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \int_0^{T_f} \rho_i^2(t) dt} \quad (13)$$

当第*k*个子带脉冲频段内不存在CI时,则 $\text{var}\{C_k(q)\} \approx 0$,从而 $\psi_k \approx 0$,而当第*k*个子带脉冲频段内存在NBI时,则 $\text{var}\{C_k(q)\} \gg 0$,从而 $\psi_k \gg 0$,因此可根据上述判据,来确定CI存在的子带脉冲位置。当只存在一个CI时,算法可简化为求 $\psi_i, i = 1, 2, \dots, M$ 的最大值,从而来确定CI的位置。有了CI位置信息后,可在干扰检测与躲避单元中将该子带的相关处理结果进行丢弃处理,来调整最终参加信息判决的相关处理量,具体表示为:

$$C(q) = \sum_{i=1, i \neq k}^M C_i(q) \quad (14)$$

式中*k*为存在CI的子带脉冲位置。

所恢复的信息数据 α_q 可表示为:

$$\alpha_q = \text{sign} \left\{ \sum_{p=1}^{N_b} \sum_{i=1, i \neq k}^M C_i[n - (qN_b + p - 1)T_f] \right\} \quad (15)$$

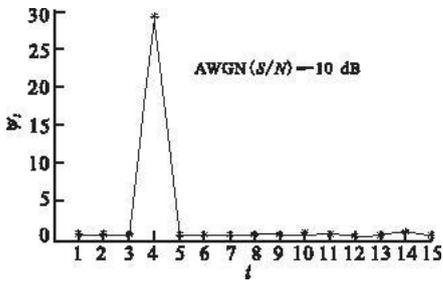
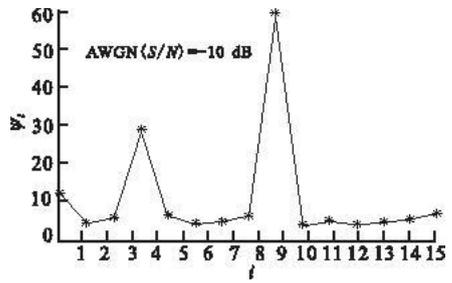
从式(15)可以看出,由于存在CI的子带脉冲相关处理结果(基于并发子带干扰检测算法)未参加信息判决,从而保证了MB-UWB通信系统在高速数据传输的条件下对CI的有效抑制。

3 计算机仿真

针对第2节提出的并发子带干扰检测算法,本节对该算法所构造算子的有效性进行了计算机仿真。设并发MB-UWB系统子带脉冲为15个,每个子带的带宽约为500 MHz,子带脉冲波形函数详见式(2),脉冲帧长为10 ns;干扰为BPSK调制信号,载频为4.85 GHz,带宽为40 MHz,与UWB信号的信干比 $\text{SIR}_{\text{uwb/bpsk}} = -20$ dB, $\psi_i, i = 1, 2, \dots, 15$ (*i*为子带位置)的仿真结果见图4。

当干扰为2个BPSK信号时(干扰信号1:载频为4.85 GHz,带宽为40 MHz, $\text{SIR}_{\text{uwb/bpsk}} = -20$ dB;干扰信号2:载频为7.35 GHz,带宽为200 MHz, $\text{SIR}_{\text{uwb/bpsk}} = -40$ dB), $\psi_i, i = 1, 2, \dots, 15$ 的仿真结果见图5。

从仿真结果图4中可以明显看出, $\psi_4 \gg \psi_i, i = 1, 2, \dots, 15, i \neq 4$,而 ψ_4 所对应的子带脉冲频段为4.6 GHz - 5.1 GHz,恰好反映了该频段子带脉冲被大干扰进行污染的情况,于是可将该子带脉冲相关结果进行丢弃,从而使并发MB-UWB系统对该窄带干扰进行了有效地抑制。从图5的仿真结果可以看出,当存在2个窄带干扰时,并发子带干扰检测算法可使 $\psi_9, \psi_4 \gg \psi_i, i = 1, 2, \dots, 15, i \neq 4, 9$,而与之对应的子带脉冲频段分别为:4.6 GHz - 5.1 GHz, 7.1 GHz - 7.6 GHz,也恰好与各干扰的所在频段相吻合,后续处理方法同上。可使MB-UWB系统的误码率性能显著提高,而且UWB系统AD采样的采样速率可极大降低(为100 MHz等同UWB脉冲帧频率量级)。

图4 存在1个窄带干扰时 ψ_i 的仿真结果图Fig. 4 The simulating results of ψ_i when there exist only one CI图5 存在2个窄带干扰时 ψ_i 的仿真结果图Fig. 5 The simulating results of ψ_i when there exist two CI

当信道中存在 IEEE802.11a WLAN 信号(分为 10 个信道,每个信道 20 MHz,8 个信息信道,2 个保护信道,信号使用频段为 5.15 GHz - 5.35 GHz, $SIR_{\text{uwb}/\text{ieee802.11a}} = -20$ dB)与 BPSK 窄带信号干扰(载频为 7.35 GHz,信息速率 = 100 Mbps, $SIR_{\text{uwb}/\text{bpsk}} = -40$ dB)时,并发 MB-UWB 系统的误码率仿真结果见图 6。

从图 6 可明显看出,将并发子带干扰检测算法与并发 MB-UWB 调制方案相结合,不仅可以极大地提高 UWB 系统的信息传输速率,而且可对多个 CI(例如 IEEE802.11a WLAN 信号干扰等)进行有效地抑制,从而最终使系统的误码率性能显著提高。

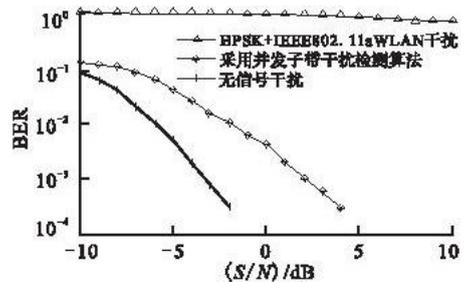


图6 并发 MB-UWB 通信系统的误码率仿真结果图

Fig. 6 The simulating results of BER of parallel MB-UWB system

4 结论

本文基于传统 MB-UWB 调制方案,分析了其在数据传输速率上的不足,提出了其改进调制方案——并发 MB-UWB 调制方案,并对其信号进行了数学建模和分析,同时针对所提出方案的特点,提出了一种低采样率 CI 的有效检测算法——并发子带干扰检测算法。该算法对相关信号的采样可在 UWB 帧速率量级实现,并结合并发 MB-UWB 的后续干扰抑制处理,可有效地改善共存干扰条件下 UWB 系统的数据传输的性能。本文对 CI 的处理是基于第 3 种 CI 的处理方式,其它 2 种对 CI 的处理方式本文没有涉及,在后续的相关内容的研究中,针对上述 2 种 CI 处理方式,是否能很好地与本文所提出的并行子带干扰检测算法进行有效结合,将是该论文后期的主要研究工作。除此之外,进一步降低系统采样速率也是该论文后期继续努力的方向。

参考文献:

- [1] Hanna Salim A. UWB Developments within Task Group 1/8 of the ITU-R [C]//Proceedings of IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies 2004. [S. l.]:IEEE,2004:31-34.
- [2] Fernando Ramire Mireles. On The Performance of Ultra-Wideband Signals in Gaussian Noise and Dense Multipath [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2001,50(1):224-247.
- [3] Foerster J, Green E, Somayazula S, et al. Ultra-Wideband Technology for Short- or Medium-Range Wireless Communications [J]. Intel Technology Journal, 2001, Q2:1-11.
- [4] Revision of Part 15 the Communication's Rule Regarding Ultra-Wideband Transmitter Systems [R]. ET Docket 98-153, 2002.
- [5] Choi Sang Sung, Oh Woo Jin. Analysis the Interference of Pulse Position Modulated UWB in IEEE802.11 A WLAN [C]//Proceedings of IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies. Kyoto:IEEE Press,2004:328-331.
- [6] Firozakhsh B, Pratt G, Jayant N. Analysis of IEEE 802.11a Interference on UWB Systems [C]//Proceedings of IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies. [S. l.]:IEEE Press,2003:473-477.

- [7] 蒋磊,王永生,郭建新. 超宽带 TH-PPM 调制技术抗干扰性能研究[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(5):670-674.
- JIANG Lei, WANG Yongsheng, GUO Jianxin. Performance of Ultra-Wideband TH-PPM Communications in the Presence of Interference[J]. System Engineering and Electronics,2006,28(5):670-674. (in Chinese)
- [8] Baccarelli E, Biagi M, Taglione L. A Novel Approach to In-Band Interference Mitigation in Ultra Wide Band Radio Systems [C]//Proceedings of IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies 2002. Baltimore:IEEE Press,2002:297-301.
- [9] Bayesteh A, Nasiri Kenari M. Iterative Interference Cancellation and Decoding for a Coded UWB TH-CDMA System in Multipath Channel Using MMSE Filter[C]//Proceedings of IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. [S. l.]:IEEE Press,2003:1555-1559.
- [10] JIANG Lei, WANG Yongsheng, GUO Jianxin. A Novel Approach to Interference Mitigation for UWB Pulse Radio[C]//Proceedings of IEEE Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing(WICOM). New Jersey:IEEE Press,2005:337-340.
- [11] JIANG Lei, GUO Jianxin, WANG Yongsheng. A Novel Approach To Interference Mitigation with Coexisting Spectrum Users for UWB Pulse Radio[C]//Proceedings of IEEE Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WICOM). [S. l.]:IEEE Press,2006:337-340.
- [12] Kelly J. Time Domain's Proposal for UWB Multi-band Alternate Physical Layer for 802.15.3a[C]//IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks(WPANS). New York:IEEE Press,2003.
- [13] Gonzalez Oscar V, Moreno Wilfrido A. Narrowband Interference Detection in Multiband UWB Systems[C]//Proceedings of IEEE Symposium on Advances in Wired and Wireless Communication 2005. Princeton:IEEE Press,2005:160-163.

(编辑:徐楠楠)

Interference Detection for MB-UWB Communications

JIANG Lei¹, HOU Jun², XU Hua¹, GUO Jian-xin¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Automation Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The algorithm of interference detection for Multi-band Ultra-wideband communication system is analyzed and discussed in this paper. A modified scheme named parallel multi-band UWB is presented to improve the data transmission speed of the traditional MB-UWB scheme. In order to meet the requirement for high data transmission speed, an orthogonal operation of sub-pulse is designed. The performance of interference suppression for parallel multi-band ultra-wideband communications is mathematically analyzed and described. Based on this new scheme, a new algorithm named parallel sub-pulse interference detection is proposed. This new algorithm can be realized in low level sample rate. Mathematic analysis and computer simulation for this new algorithm are made. The simulation results show that the new algorithm can detect the coexisting interference effectively in low sample rate and improve the BER performance of parallel multi-band UWB communication system evidently in combination with the interference suppression measures.

Key words: interference suppression; ultra-wideband; interference detection; IEEE802.11a; pulse polarity modulation