

# 并行组合扩频超宽带系统调制方法及性能分析

窦 峥<sup>1</sup>, 孙立霞<sup>2</sup>, 沙学军<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 通信技术研究中心, 150001 哈尔滨; 2. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 150001 哈尔滨)

**摘要:** 为提高超宽带系统的抗干扰性能, 在分析并行组合扩频通信和超宽带通信系统技术特征的基础上, 结合这两种通信方式的技术优势, 提出一种基于并行组合扩频的超宽带(PCSS-UWB)通信系统方案, 并将高性能的 MBOK 调制方式应用到该系统. 文章定性分析了基于 PCSS-UWB 通信系统性能与频带利用率关系, 得出系统性能与并行组合扩频技术每次所能传输信息数据比特数有关的结论. 仿真结果表明, 当误码率为  $10^{-4}$  时 MBOK 调制方式较传统的 PPM 调制方式的信噪比有约 9 dB 的提高.

**关键词:** 并行组合扩频(PCSS); 超宽带(UWB); 多进制双正交键控调制(MBOK); DSSS-UWB

中图分类号: TN918.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)11-0046-05

## Modulation mode and performance analysis of uwb communication system based on parallel combinatory spread spectrum

DOU Zheng<sup>1</sup>, SUN Li-xia<sup>2</sup>, SHA Xue-jun<sup>1</sup>

(1. Communication Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. Information and Communication Engineering College, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** To improve the anti-interference performance of UWB communication system, a new UWB communication system based on parallel combinatory spread spectrum is proposed after analyzing the characteristics of UWB and PCSS. The application of  $M$ -ary bi-orthogonal keying (MBOK) modulation in the new system is also discussed. In this paper, qualitative analysis is made to analyze the relationship between the system performance and band efficiency, and conclusion is got that the performance of PCSS-UWB communication system is related with the number of the transmission data in PCSS technology. Simulation shows that  $E_b/N_0$  is improved 9 dB in the system with MBOK modulation than that in the system with PPM modulation when BER is  $10^{-4}$ .

**Key words:** PCSS; UWB; MBOK; DSSS-UWB

现代无线通信系统衡量系统性能的两个重要技术指标分别是安全性和高效性. 并行组合扩频技术(PCSS)简称并扩, 因其具有强抗干扰性, 因此被作为一种有效的扩频技术使用; 超宽带技术(UWB)由于具有超高传输速率等技术优势越来越多的受到人们的关注<sup>[1-4]</sup>. 根据实现方式的不同, UWB 通信技术可分为脉冲无线电(IR-UWB)和多频带正交频分复用超宽带(MB-OFDM UWB)两类. IR-UWB 以持续时间超短的冲激脉冲作为

载体传递信息<sup>[5-6]</sup>, 在频域具有极宽频带具有传输吉比特数据流的传输能力. 此外, UWB 还具有极强的多路接入能力、隐蔽通信能力、精确的时间位置定位和范围定位等技术优势而被认为是现今最有发展前景的十大通信技术之一.

本文的研究主要在 IR-UWB 技术基础上, 结合具有保密性和抗干扰的 PCSS 技术, 使 UWB 系统具备高效性和安全性技术指标, 与常规 UWB 系统相比具有更好的保密性能. 基于并行组合扩频的超宽带系统(简称并扩超宽带, PCSS-UWB)是在研究分析基于直接序列扩频的超宽带(DSSS-UWB)系统特点之上提出的, 将直接序列扩频序列(DSSS)引入 UWB 系统中对于 UWB 系

收稿日期: 2011-05-16.

基金项目: 黑龙江省博士后基金资助项目(LBH-Z08126).

作者简介: 窦 峥(1978—), 男, 副教授;

沙学军(1966—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 窦 峥, douzheng@hrbeu.edu.cn.

统抗干扰性能有了极好的改善, 但缺点是在该系统下频带利用率较低<sup>[7]</sup>; 而将软扩频技术 PCSS 引入到 UWB 中, 较之 DSSS-UWB 技术, 其频带效率可以得到更好的改善, 且继承了强抗干扰性的优点. 并扩超宽带通信技术是一种全新的通信技术体制, 一种高效的短距离无线传输技术.

### 1 并扩超宽带通信系统

并扩超宽带通信系统机理是基于超宽带系统, 结合并扩技术, 使新超宽带系统同时具备安全性和高效性. 并扩超宽带通信系统收发机原理如图 1~2 所示.

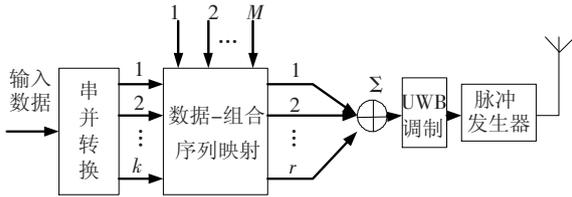


图 1 并扩超宽带通信系统发射端原理

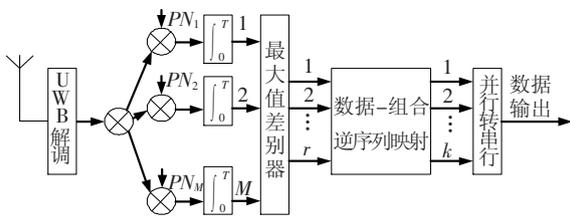


图 2 并扩超宽带通信系统接收端原理

从图 1 可看出, 并扩超宽带通信系统在结构上可分为两个模块: PCSS 系统模块和 UWB 系统模块. 但两个模块的组合并不意味着该系统将由 PCSS 和 UWB 系统模块简单的进行叠加, 而是需要实际解决两个通信系统融合的结合点问题, 具体解决方法将下面章节进行分析.

PCSS 技术是一种具有较高信息传输能力的通信方式, 是基于  $M_{\text{may}}$ 、 $M_{\text{b-ary}}$  扩频通信技术而得

来的<sup>[8-9]</sup>. 其产生机理是通过数据 - 序列映射算法, 从  $M$  个正交扩频编码序列中选择  $r$  个, 经调制后发射, 根据数理统计方法计算共有  $C_M^r$  种发送扩频编码状态, 可以载荷  $\log_2 C_M^r$  个比特信息, 考虑扩频序列具有正负两种极性状态, 则共有  $2^r C_M^r$  种发送状态. 在此, 假设该系统传输能力为  $K$  比特信息数据, 则可得到公式为

$$K = r + \lfloor \log_2 C_M^r \rfloor. \quad (1)$$

其中  $\lfloor x \rfloor$  表示对  $x$  取整数部分,  $C_M^r$  是  $M$  中取  $r$  的组合. 因此, 从  $M$  个正交扩频编码序列族中选择并行传输  $r$  个正交扩频编码序列, 可以达到传输  $K$  比特信息数据的目的.

在公式(1)中, 如果  $M = N$  (扩频序列长),  $r = M/4$  时,  $K \geq N(B)$ ; 当  $r = (2/3)M$  时, 具有最大的信息传输能力, 载荷最多信息数据, 约为  $K_{\text{max}} = 1.5 M(B)$ , 此时具有极高的通信效率<sup>[10]</sup>.

图 3 为选定 Walsh 码和 Gold 码作为伪随机序列码时, 分别对基于 PCSS-UWB 通信系统性能的影响. 其中图 3(a) 仿真实验使用的相关参数为 Walsh 码码长为 64, Gold 码码长为 63, 假设在同步情况下进行, 仿真参数设置见表 1 所列. 图 3(b) 和 (c) 中采用码长为 128、512 的 Walsh 码和 127、511 的 Gold 码, 其他参数与表 1 相同. 从图 3(a) 中可以清楚的看出, 选取码长为 64 的 Walsh 码与 63 的 Gold 码对系统性能影响不大, 当 Walsh 码和 Gold 周期码长增大到 128 和 127、512 和 511, 可从图 3(b)、(c) 中看出, 在同步的情况下, 两种伪随机码对系统性能的影响差别很小, 但扩频序列的周期码长对系统性能的影响差别很大, 原因是由于不同长度的扩频码序列调制相同数量数据时, 码长越长对系统所引入的扩频增益越大, 抗干扰能力越强, 相应地 PCSS-UWB 系统接收端得到的系统性能应越好.

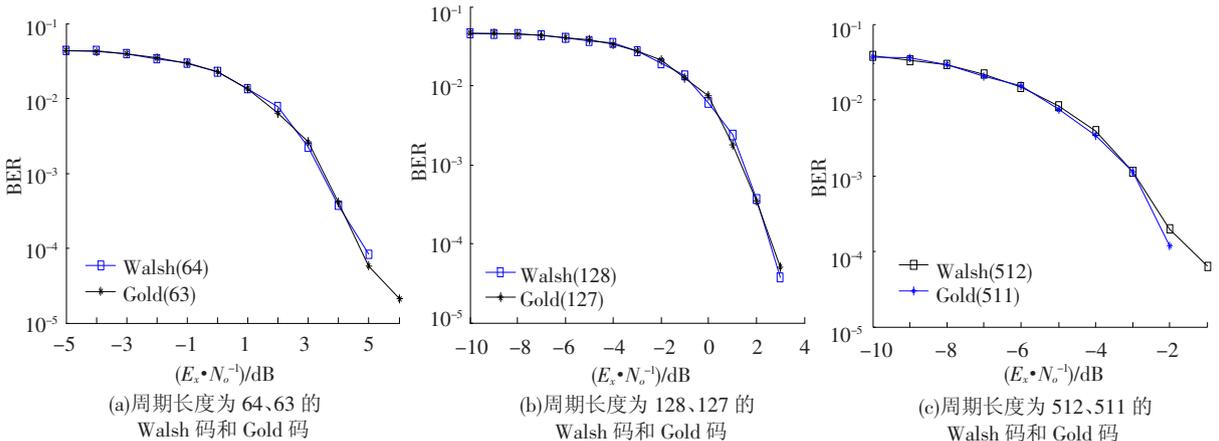


图 3 不同伪随机码类型以及不同长度的伪随机码对系统误码率性能的影响

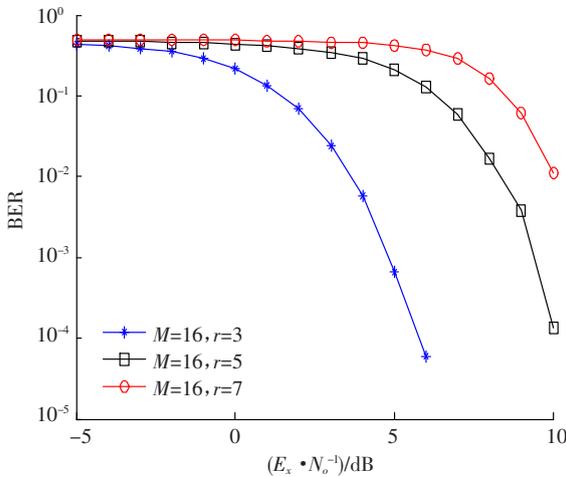
表1 仿真参数

扩频序列码型	码周期长度	传输数据量/B	扩频序列族	传输序列条数	UWB 调制方式	UWB 调制脉冲
Walsh 码	64	12 000	16	3	MPPM	高斯二阶导数脉冲
Gold 码	63	12 000	16	3	MPPM	高斯二阶导数脉冲

PCSS 模块中伪随机序列条数  $r$  的不同对系统性能的影响,将在下面进行分析.图4为不同伪随机序列条数对系统误码率性能的影响.仿真条件为  $M = 16, r = 3, 5, 7$ ,其他条件相同,如表2所

表2 选择传输扩频序列条数  $r$  影响系统性能的相关参数

扩频序列码型	频码周期长度	传输数据量/B	扩频序列族	传输序列条数	UWB 调制方式	UWB 调制脉冲
Walsh 码	64	12 000	16	3	MPPM	高斯二阶导数脉冲
Walsh 码	64	12 000	16	5	MPPM	高斯二阶导数脉冲
Walsh 码	64	12 000	16	7	MPPM	高斯二阶导数脉冲

图4 伪随机序列条数  $r$  取值对系统误码率性能的影响

在系统收信机接收端,为了恢复发信机发送的信息数据,必须先经过 PCSS 解扩处理,方法是:接收信号经过最大值判决器选出发信机选择传输的  $r$  条正交扩频编码序列,而后根据数据-序列逆映射算法和并/串转换器可成功的译出传送的  $K$  比特信息数据.

## 2 MBOK 调制方式在基于并扩的超宽带通信系统中应用

不同的调制方式将影响 PCSS-UWB 通信系统的频带利用率、系统增益、误码率、信息传输速率等性能,为了使 PCSS-UWB 通信系统得到更好的系统性能,选择合适的调制方式是很重要的,本节主要分析不同的调制方式 ( $M$  进制双正交键控、脉冲位置调制)对系统的影响进行仿真,不同的调制方式对系统的信息传输速率、频带利用率、误码率、系统增益等方面产生不同的影响,为了尽可能的提高系统性能,选择适合基于并扩的超宽带通信系统的调制方式至关重要.脉冲位置调制方式是超宽带通信系统中最常用、最简单的调制

方式.仿真结果表明  $M = 16, r = 3$  时系统误码率性能最理想.后续的系统仿真将建立在以上得出结论的基础上进行.

方式,但其是否适合新的系统,还有待研究.

脉冲位置调制 (PPM) 是通过脉冲时间位置的不同来载荷调制数据的.最常见的是 2-PPM,其调制原理为:当调制数据是“1”时脉冲相对于参考位置产生 1 个时偏,脉冲间隔变为脉冲周期加或减去偏移量;当调制数据是“0”,脉冲相对于参考位置不产生偏移<sup>[8]</sup>,脉冲间隔仍然是 1 个脉冲周期.本系统中采用 TH-PPM 调制信号表达式为

$$s(t) = \sqrt{E_c} \sum_{j=-\infty}^{\infty} p(t - jT_s - c_j T_c - b_k \delta_p). \quad (2)$$

其中:  $b_k \in \{0, 1\}$  是调制数据;  $\delta_p$  是脉冲偏移;  $T_s$  是符号时间间隔;  $T_c$  为码片时间间隔;  $E_c$  为发射信号单位码片的能量.

正交 PPM 调制信号的误码率公式<sup>[11]</sup>为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_x}{2N_0}} \right]. \quad (3)$$

其中:  $E_x = E_b/N_s$ ,  $E_x$  为接收信号单位码片能量,  $E_b$  为单位比特信号能量,  $N_s$  为重复脉冲数量.因此,误码率公式可转化为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{E_b}{2N_s N_0}} \right]. \quad (4)$$

MBOK 调制方式是软扩频的关键技术之一,是以  $M'$  ( $M'$  为与前文扩频序列族  $M$  区别) 元双正交码作为扩频码,使用双正交编码序列对每 1 个信源数据扩频.在接收端使用与发射端相同的正交扩频编码序列码集进行相关运算,经最大值判决器后还原信源数据.

假设 MBOK 调制方式选取  $M'/2$  条正交扩频码集为  $\{c_0, c_1, \dots, c_{(M'/2-1)}\}$ 、 $\{c_{M'/2}, c_{M'/2+1}, \dots, c_{M'-1}\}$  的  $I$  路和  $Q$  路信号,其中  $c_i = \{c_{i,0}, c_{i,1}, \dots, c_{i,N_c-1}\}$  是长为  $N_c$  的伪随机序列,基于 MBOK 调制方式下的发送信号可以表示为

$$s(t) = \sqrt{E_c} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=0}^{N_c-1} (c_{i,l}) p(t - iT_s - lT_c), \quad (5)$$

其中  $T_s = N_c T_c$ ,  $T_s$  为符号时间间隔。

接收端第  $i$  个相关器正确解调概率为

$$P_{c_i} = \int_{-\sqrt{\frac{2E}{N_0}} \sqrt{2\pi}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (1 - 2Q[\sqrt{nv} + \sqrt{\frac{2nE}{N_0}}]^{M'-1}) \cdot \exp\left(-\frac{n \times v^2}{2}\right) dv,$$

可得到 MBOK 调制信号误码率公式<sup>[12]</sup>为

$$P_e = 1 - \sqrt{n} \int_{-\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \sqrt{2\pi}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (1 - 2Q[\sqrt{nv} + \sqrt{\frac{2nE_b}{N_0}}]^{M'-1}) \exp\left(-\frac{n \times v^2}{2}\right) dv. \quad (6)$$

其中:  $n = \log_2 M'$ ;  $E_b$  为单位比特信号能量;  $N_0$  为噪声功率谱密度。

从图 2 可见, 在并扩超宽带通信系统发信机发射端, 从  $M$  个扩频序列中选择传输  $r$  条随机序列, 经叠加器后形成具有  $r + 1$  值的多值随机序列。UWB 系统模块对多值随机序列的调制必须建立合理的 UWB 调制方式或编码方式, 因此 UWB 系统模块与 PCSS 系统模块的融合是建立在多进制调制或者合理的编码基础上的。

在 PCSS-UWB 仿真实验中选取 3 条随机序列条数 (即  $r = 3$ ), 则累加器输出端为  $\pm 1/\pm 3$  的 4 值码元序列, 为使二进制 PPM 调制方式可以载荷 4 值码元序列, 必须对 4 值码元序列进行二次编码后变成二进制随机序列, 后选取 PPM 调制方式进行调制发射信号, 此时 PPM 调制方式成功应用于新系统。但由于信息经过二次编码, 将产生相位模糊, PCSS-UWB 系统性能将受到影响。

MBOK 调制方式在该系统中的应用, 只需选取 4 元双正交码元序列作为扩频码对 4 值码元序列进行扩频, 不需要再次编码处理即可与新系统结合, 系统结构更加简单, 另一方面引入了扩频增益, 有益于系统性能的提高。

为进一步考虑 MBOK、PPM 两种调制方式下并扩超宽带通信系统的差异, 进行实验仿真。仿真选取扩频序列族条数  $M = 16$ , 选择传输扩频序列条数  $r = 3$ , 选取周期长度为 64 的 Walsh 码作为并行组合扩频序列的扩频码, MBOK 调制方式中扩频码长度为 24, 发射端发送信息比特数为 12 000 个, 假设同步, 其他仿真参数如表 3 所示, 采用蒙特卡洛仿真, 重复发送 100 次信源数据, 得到的平均误码率如图 5 所示。

表 3 仿真所需参数

UWB	扩频序列 码型	码周期 长度	扩频序 列族	传输序列 条数
MBOK	Walsh 码	64	16	3
PPM	Walsh 码	64	16	3

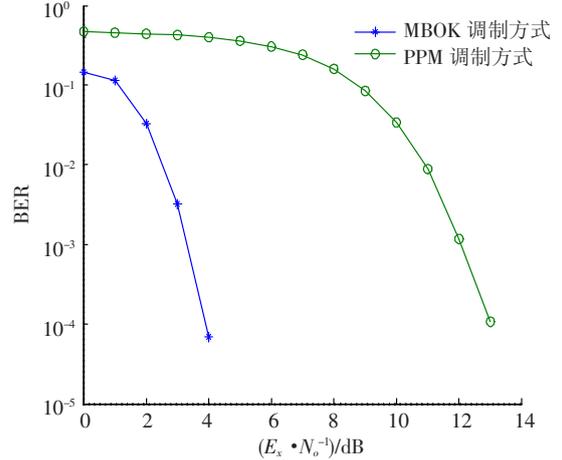


图 5 不同调制方式下并扩超宽带系统的误码率

从图 5 可看出, 在仿真参数和信噪比均相同的条件下, MBOK 调制方式下的系统平均误码率明显低于 PPM 调制方式下的系统平均误码率, 若为使系统平均误码率达到  $10^{-4}$ , 选取 MBOK 调制方式的系统较选取 PPM 调制方式的系统所需的信噪比少约 9 dB。因为在基于 PPM 调制方式的 PCSS-UWB 通信系统中采用二次编码的信息处理过程, 引入相位模糊, 影响了系统的误码率性能; 基于 MBOK 调制方式的 PCSS-UWB 通信系统以多进制调制方式的手段简单、高效地载荷多值信息, 有利于系统性能的提高。因此在理论上基于 MBOK 调制方式的 PCSS-UWB 系统性能也应该比基于 PPM 调制方式的 PCSS-UWB 系统优良。可见, 在相同条件下, 在 PCSS-UWB 通信系统中, MBOK 调制方式比 PPM 调制方式更适合在其中应用。

下面将从传输效率的角度定性分析应用 MBOK 调制式的新系统性能变化。信息速率和频带利用率均是反映传输效率的 1 个重要标志。频带利用率是指单位频带内所能传输的信息速率:

$$\eta_b = R_b / W \text{ (baud/Hz)}. \quad (7)$$

其中  $R_b$  为信息传输速率,  $W$  为信道的带宽。

假设基于直接序列扩频的超宽带系统、基于并行组合扩频的超宽带系统输入端信息速率均为  $R_b$  持续时间为  $T_b$ , 且均使用的是码长为  $N$ 、持续时间为  $T_s$  的伪随机序列进行扩频。假设信道带宽  $W = 1/T_s$ , 则根据二者的扩频机制为

$$\eta_{b_1} = (1 \times T_b^{-1})/T_s^{-1} = T_s^{-1}/T_b^{-1} = N^{-1},$$

$$\eta_{b_2} = (K \times T_b^{-1})/T_s^{-1} = K \times (T_s^{-1}/T_b^{-1}) = K/N.$$

其中  $K$  为并行组合扩频技术所能传输的数据比特数。因此,基于直接序列扩频的超宽带系统和基于并行组合扩频超宽带系统的频带利用率分别为  $\eta_1 = 1/N$ 、 $\eta_2 = K/N$ 。可见并行组合扩频超宽带系统较之直接序列扩频超宽带系统的频带效率有了  $K$  倍的提高,另外也验证了扩频增益即抗干扰能力与频带利用率之间的矛盾关系。

假设 MBOK 调制方式利用一组码长为  $N'$  的正交扩频码作为扩频码字来传输信息,那么与二进制传统 PPM 调制方式相比,每个扩频序列传送  $\log_2 M'$  比特的信息,当信道频带受限制时可以使信息传输率(比特率)增加,从而提高频带利用率;另外根据上述定义可知 MBOK 调制方式较传统的 PPM 调制方式有  $N'$  倍的扩频增益,抗干扰性能更好。定量分析不同调制方式条件下并行组合扩频超宽带通信系统性能与频带利用率的关系将在其他文章中详细论述。

可见,不同的调制方式对系统性能的各项指标有不同的影响,当对抗噪声性能和比特速率要求较高时,无疑使用 MBOK 调制方式的基于并行组合扩频的超宽带系统是 1 个合适的选择。

### 3 结 论

本文研究了并扩超宽带通信系统模型,将 MBOK 调制方式应用到该系统,得出如下结论:

1) MBOK 调制方式下的 PCSS-UWB 通信系统平均误码率低于 PPM 调制方式下的 PCSS-UWB 系统平均误码率;

2) 在误码率为  $10^{-4}$  时 MBOK 调制方式较 PPM 调制方式所需信噪比少约 9 dB;

3) 从频带利用率的角度定性分析,引入并行组合扩频技术到超宽带系统中较之直接序列扩频超宽带通信系统好,优点在于不但保留了良好的抗干扰性能,而且频带利用率有  $K$  倍提高。

4) 从理论简要分析了 MBOK 多进制调制方式较之二进制调制方式在频带利用率和抗干扰性能的优势,因此 MBOK 调制方式较之传统的 PPM 调制方式是一种更适合 PCSS-UWB 通信系统的调制方式。

### 参考文献:

- [1] 王金龙,王呈贵. 无线超宽带通信原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2005:1-22.
- [2] SASAKI S, ZHU Jinkang. Performance of Parallel Combinatory Spread Spectrum Multiple Access Communication Systems [C]//IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. London, U K:[s. n.], 1991:204-208.
- [3] GUO Lili, LI Beiming. Ber performance of complex parallel combinatory spread spectrum communication system [C]//Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on. Shanghai:[s. n.], 2007:1365-1368.
- [4] ARSLAN H, CHEN Zhining, DI B M. Ultra wideband wireless communication [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2006:1-3.
- [5] FONTANA R J. Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004, 52(9):2087-2104.
- [6] YANG Liuqing, GIANNAKIS G B. Ultra-wideband communications: an idea whose time has come [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(6):3.
- [7] 衣强. 并行组合扩频系统抗干扰性能及映射算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2007:4-14.
- [8] 朱近康,冯明臣. 并行组合扩频通信的数据调制映射法和安全通信协议方式 [J]. 电子学报, 1993, 21(1):59-66.
- [9] ZHU Jinkang, MARUBAYASHI G. Properties and application of parallel combinatory SS communication system [C]//IEEE Second International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA'92). Yokohama:[s. n.], 1992:227-230.
- [10] ZHU Jinkang, SASAKI S, MARUBAYASHI G. Proposal of parallel combinatory spread spectrum communication systems [J]. IEICE of Japan, 1991, J74-BII(5):207-214.
- [11] 贝尼迪特. 超宽带无线电基础[M]. 葛利嘉,朱林,等,译. 北京:电子工业出版社, 2005:1-8.
- [12] 王彬,张水莲. 基于 HFA3860 扩频基带处理器的 MBOK 扩频调制技术研究 [J]. 电讯技术, 2004, 40(4):71-76.

(编辑 张 宏)