

超宽带通信的正交正弦相关接收方法

黄 岭 尹华锐 卫 国 朱近康

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

摘 要 超宽带通信中,实现窄于 1ns 的脉冲信号的准确接收是个很大的挑战。目前很多文献都是采用匹配滤波器方法进行接收,并在此基础上分析性能。但由于匹配滤波器输出的相关峰的宽度太窄,因而系统对定时抖动较为敏感。定时偏差较大时,接收性能将急剧下降。而且对各路随机定时的多径信号进行相关接收也是一个很大的难题。该文提出一种新的超宽带脉冲接收方法,该方法允许较大的定时偏差,并且能够提供多路随机定时的相关模板,同时接收信噪比的损失被控制在一个可接受的水平。

关键词 UWB, 正交正弦相关, 定时误差, 信噪比

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-1077-05

Orthogonal Sinusoidal Correlation Receiver in UWB Communication

Huang Han Yin Hua-rui Wei Guo Zhu Jin-kang

(PCN&SS Lab. Dept. EEIS, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract It is a great challenge in UWB communication systems to receive the subnanosecond pulses properly. Most literatures analyzed the performance of UWB systems based on match filter receiver. But the system performance will degrade greatly when there is big timing error. And the match filter receiver can hardly provide several correlation templates with different timings. In this paper, a novel method to receive the subnanosecond pulses is proposed. This method is tolerant against timing error, and can provide correlation templates with different timings. In addition, the performance degradation of this receiver is acceptable.

Key words UWB, Orthogonal sinusoidal correlation, Timing error, SNR

1 引言

超宽带(Ultra-Width Band, UWB)通信或者脉冲无线电(Impulse Radio, IR)系统(以下统称 UWB 系统)以其低复杂度、低功耗、低价格、高数据速率和可与现有系统共存等潜在的优异特性,正在吸引越来越多的注意。而 2002 年美国联邦通信委员会(FCC)允许 UWB 技术运用于消费性产品,并对超宽带通信的辐射功率谱进行相应的限制^[1],更促进了 UWB 设备的开发与实现。

UWB 的通信方式舍弃了传统通信中“载波”的观念,而直接利用亚纳秒级的超短脉冲来传输信息,省去了昂贵的射频器件,降低了设备的复杂度,并减少了功率消耗,因而能提供低廉而高速的通信服务。典型的 UWB 系统的发射波形是由单脉冲串连而成。单脉冲宽度一般都小于 1ns,其频谱宽达几个吉赫兹。而为了提供一定的多址能力,一般采用跳时(Time Hopping, TH)的多址方法,使其中每个单脉冲都有各自不同的伪随机延时。调制方式一般是脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM),即信息是通过整个脉冲串位置的不同来传递的。最终的发射信号也具有很宽的频谱而

功率谱密度却非常低。消费类 UWB 设备的辐射功率谱密度按照 FCC 的规定在 3.1~10.6GHz 间要低于 -41.3dBm/MHz^[1]。这样的电平仅相当于美国对于个人计算机等设备电磁干扰辐射的限制,非常有利于与其它系统共存。

在 UWB 通信系统中,信息的载体由载波转为脉冲,信号持续方式也由连续的变成间歇的,这样的转变给接收机的设计带来了很多新问题,比如捕获、跟踪、解调等。本文将探讨间歇式的脉冲信号解调接收的问题。匹配滤波器是在加性高斯白噪声干扰下对确定信号的最佳检测^[2]。相关接收机就是匹配滤波器一种实现方式,在分析 UWB 系统性能时文献基本上都采用了这样的接收机结构^[3-7]。但实现相关接收时,如果本地产生的信号波形与实际接收到的信号波形不同步,就会造成接收信噪比的损失,即系统性能下降^[4-7]。由于发送端和接收端的时钟频率不是完全相同的,而且不同路径的信号传输延时也是不同的,因此接收端和所接收信号之间的定时差别是随机的。UWB 接收机的一个实现难题就是如何使得本地相关模板和接收脉冲准确同步。如何对多路随机定时的 UWB 信号进行相关接收也是现有技术尚未解决的问题。文献[8]中提到了采用正弦波形对接收信号进行相关接收的方案。正弦相关接收更易于实现,但是同样面临信号同步

的问题。

本文提出一种采用正交的门控正弦波形与接收信号进行相关接收的方法,具有很好的可实现性,并很容易实现多个随机定时,通过仿真,表明其带来的性能下降是完全可以接受的。

文章其他部分的结构如下:第2节给出了UWB系统的模型,第3节是正交正弦相关接收的原理,第4节是正交正弦相关接收中的参数选取,第5节给出了存在定时误差时接收机的性能,最后对全文作了总结。

2 UWB 系统模型

UWB 系统的典型应用是采用脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)来携带信息而采用跳时的多址方式(Time Hopping, TH)来区别不同用户。在这样的系统中,第 k 个用户的发射信号为

$$s_{tr}^{(k)}(t^{(k)}) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} w_r(t^{(k)} - jT_f - c_j^{(k)}T_c - \delta d_{[j/N_s]})^{(k)} \quad (1)$$

其中 $t^{(k)}$ 是第 k 个用户的时钟, T_f 是脉冲重复时间。 $\{c_j^{(k)}\}$ 是第 k 个用户的跳时序列(它使得第 j 个脉冲延时了 $c_j^{(k)}T_c$),而 T_c 是多址码延时单位。当传输数据比特 d 为‘1’时脉冲会被延时 δ ,而当 d 为‘0’时脉冲没有额外延时。 $w_r(t)$ 是单个脉冲的波形。在这样一个 TH-PPM 系统中,接收端的性能取决于如何实现一个个单脉冲的接收。

UWB 系统中,典型的理想脉冲接收波形表达式为

$$w_r(t) = \left[1 - 4\pi \left[\frac{t}{t_{au}} \right]^2 \right] \exp \left(-2\pi \left[\frac{t}{t_{au}} \right]^2 \right) \quad (2)$$

其中 t_{au} 的典型值为 0.2877ns ,此时其波形见图1:

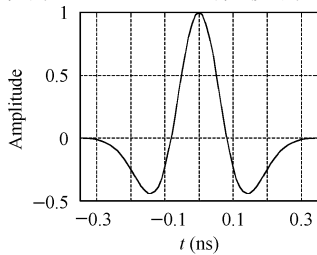


图1 典型的理想单脉冲接收波形

Fig.1 The waveform of a typical ideal monocycle

在文献[3,4]中讨论到超宽带信号接收时,都采用相关接收的方法。其接收原理框图如图2。由图2可见,接收机产生的与理想接收信号相同的波形来与实际接收到的信号进行相关,用相关结果来作最终判决。由于用来作相关的两个信号是完全相同的,所以其相关结果就是单个脉冲波形的自相关函数。图3即高斯脉冲(虚线)和其自相关函数(实线)。

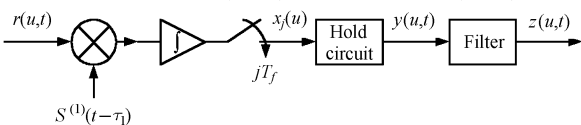


图2 传统的匹配滤波器接收机

Fig.2 The traditional match filter receiver

从图3中可见,高斯脉冲自相关函数的主瓣宽度很窄,仅 170ps 。在现有技术条件下,要对持续时间如此短的信号进行采样是非常困难的,而且定时的不准确会带来系统性能的显著降低^[4-7],因而对接收机的定时提出了很高的要求。文献[4]指出如果均方根定时误差达到 40ps 以上,系统容量将下降一半。

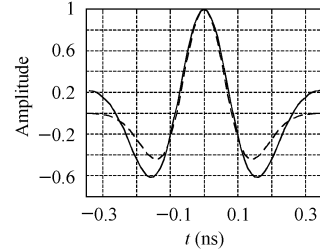


图3 理想单脉冲接收波形及其匹配滤波器输出

Fig.3 The waveform of the ideal monocycle and the output of match filter

同时,由于UWB的信号带宽高达几个吉赫兹,为了避免干扰工作在其它频率的系统和设备,美国FCC对UWB无线通信系统的功率谱密度设了一个上限(-41.3dBm/MHz)^[1],因而从天线辐射的总功率是有限的。而在多径信道中,接收信号的能量被分散在不同的径中。为了实现有效的接收,一个实际系统必须能够收集足够多的多径能量,以提高信噪比。但对于一个采用相关接收的系统来说,必须能在接收端根据不同的多径产生不同定时的本地相关信号。而这些多径的延时是随环境变化的,没有统一的时间间隔,这就给本地相关信号的定时提出了新的难题。

针对匹配滤波接收模板产生的困难,文献[8]中提到可以采用门控的正弦波进行超宽带信号接收的方法。这种非相关接收的方法在高斯白噪声信道下比匹配滤波器会带来一定的SNR损失,但实现起来却很方便。但是,文献[8]存在与相关接收一样的同步问题。

3 正交正弦相关接收原理

我们经过仔细分析,发现如果采用两路正交的正弦信号分别对接收信号进行相关,两路相关输出结果恰好是定时误差的正弦和余弦函数。因此,可以通过两路输出的三角运算得到时间误差。而且这个新方法比起时间对齐时的正弦相关方法,没有带来额外能量损失。

由式(2)可看出,理想接收单脉冲信号是一个偶函数。在同步时,即单脉冲的峰值点和同相正弦信号的极大值点重合时,相关结果应该最大,记为

$$\int_{-T_w/2}^{T_w/2} w_r(t) \cos(\omega t) dt = A \quad (3)$$

其中 T_w 是相关区间的长度, ω 是正弦信号角频率。而由于正交正弦信号是奇函数,它与单脉冲信号的相关结果应该为

$$\int_{-T_w/2}^{T_w/2} w_r(t) \sin(\omega t) dt = 0 \quad (4)$$

假设接收信号与同相正弦信号之间存在定时误差 τ ,与

同相正弦信号的相关结果为

$$\int_{-T_w/2}^{T_w/2} w_r(t) \cos(\omega(t-\tau)) dt = A \cos(\omega\tau) \quad (5)$$

因此, 我们可以设计如图4所示的正交正弦相关接收机 (Orthogonal Sinusoidal Correlation Receiver, OSCR) 来处理 UWB 信号。

其中控制模块 (Control unit) 根据接收的脉冲信号调整压控振荡器以取得最佳的相关频率, 并提取和维持跳时序列的定时。

可以看出, 用正交正弦相关的接收方法后, 为了保证接收到的信号始终是在最佳相位处进行相关, 我们仅需要保证相关窗对接收单脉冲的有效选取, 准确度的要求比文献[8]方法的要求要低很多。而且, 不存在需要通过调整本地正弦信号的相位来保证有效接收的问题。

对于多径信号, 可以采用多个相关窗来对齐不同多径的脉冲, 因为定时要求降低, 所以非常便于实现。在多径环境中采用的正交正弦相关接收机的原理框图如图5所示。

由于跳时码在不同时延条件下正交性受到一定程度的破坏, 不同的相关窗有可能捕捉到同一个径, 这可以通过判

决反馈来消除^[9-11]。

4 正交正弦相关接收中的参数选取

下面我们分析这种处理带来的 SNR 损失。

匹配滤波接收输出结果的信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{MF}} = \frac{\left[\int_{\langle T \rangle} w_r^2(t) dt \right]^2}{\text{var} \left\{ \int_{\langle T \rangle} w_r(t) n(t) dt \right\}} = \frac{2E_t}{N_0} \quad (6)$$

其中 $E_t = \int_{\langle T \rangle} w_r^2(t) dt$, 为发送信号在持续时间 T 中的能量, $n(t)$ 是单边功率谱密度为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声。

采用正弦相关接收的信噪比为

$$\text{SNR}_{\text{SC}} = \frac{\left[\int_{\langle T \rangle} w_r(t) s_c(t) dt \right]^2}{\text{var} \left\{ \int_{\langle T \rangle} s_c(t) n(t) dt \right\}} = \frac{2E_{t-r}^2}{E_c N_0} \quad (7)$$

其中 $E_{t-r} = \int_{\langle T \rangle} w_r(t) s_c(t) dt$, 是接收信号和正弦信号的相关能量, $E_c = \int_{\langle T \rangle} s_c^2(t) dt$, 为正弦信号在持续时间 T 中的能量。

正弦相关器和匹配滤波器 SNR 的差别为

$$\frac{\text{SNR}_{\text{SC}}}{\text{SNR}_{\text{MF}}} = \frac{2E_{t-r}^2}{E_c N_0} \times \frac{N_0}{2E_t} = \frac{E_{t-r}^2}{E_c E_t} \quad (8)$$

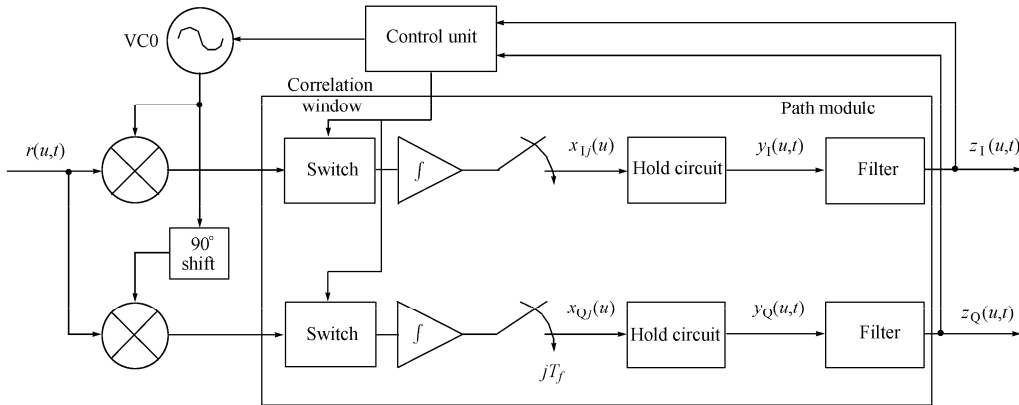


图4 正交正弦相关接收机

Fig.4 The orthogonal sinusoidal correlation receiver

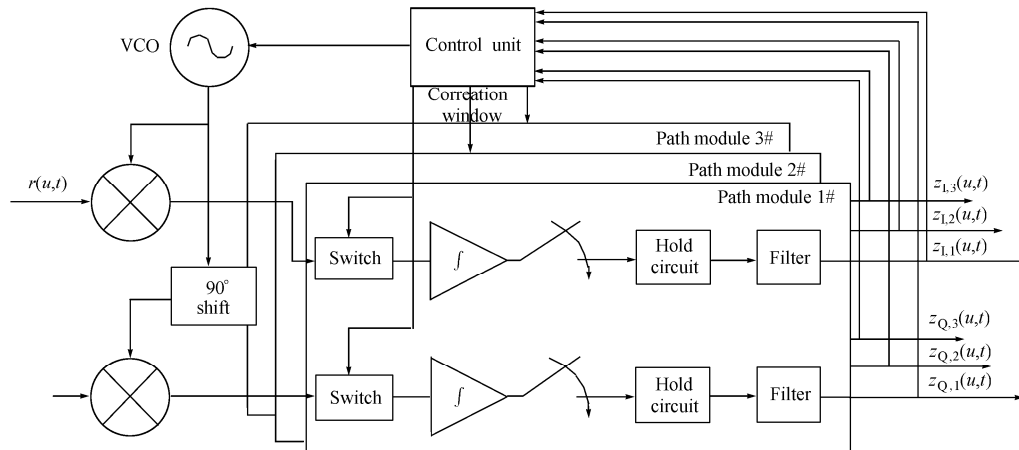


图5 多径环境中的正交正弦相关接收机

Fig.5 The OSCR for multipath environments

由于 $E_{r-r}^2 = \left(\int_{<T>} w_r(t) s_c(t) dt \right)^2 \leq \int_{<T>} w_r^2(t) dt \cdot \int_{<T>} s_c^2(t) dt = E_c E_r$, 其中等号仅在 $w_r(t) = s_c(t)$ 时成立。当等号成立时就是匹配滤波器接收。非匹配滤波器接收总会带来一定的信噪比损失。

通过以上的分析,在不同的相关频率下,信噪比的损失是不同的。图 6 给出了相关窗长等于脉冲持续时间时,正交正弦相关接收带来的信噪比损失和相关频率的关系。

从图 6 中可以清晰地看到存在一个最佳相关频率使得信噪比损失最小。但是即使是最小的信噪比损失也高达约 1.8dB。这个代价太过昂贵。考虑到单脉冲在越远离峰值点的位置幅度越小,而这部分信号的能量占整个脉冲能量比例是很低的。相关窗的宽度与所收集到的脉冲能量之间关系如图 7 所示。

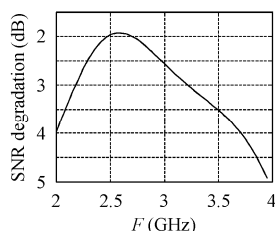


图 6 信噪比损失与相关频率的关系

Fig.6 The relation between SNR loss and correlation frequency

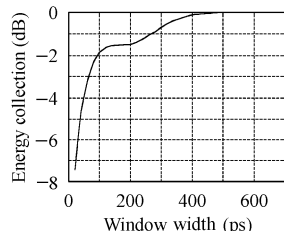


图 7 相关窗的宽度与所收集到的脉冲能量

Fig.7 The pulse energy collected vs width of correlation window

可见,在相关窗的长度大于 0.4ns 后所收集到的脉冲能量是很少的,如果相关窗的宽度与整个单脉冲的宽度一致,就会在相关窗边缘处引入过多的噪声。因此可以考虑通过减小相关窗的宽度来降低信噪比的损失。图 8 给出了在几个特定窗宽条件下的信噪比损失与相关频率的关系。图 8 中曲线清晰地显示一定程度上减小相关窗宽可以提高输出信噪比。当相关窗宽度为 0.5ns 左右时,可以达到最好效果。但当相关窗宽进一步减小输出信噪比反而会下降。而且不同的相关窗宽对应的最佳相关频率是不同的。

另外,我们还可以发现输出信噪比损失对相关频率并不是非常敏感,相关频率在最佳值附近变化不会引起性能大幅度地降低。尤其是相关窗宽度为 0.4ns 时,相关频率在最佳值附近变化 $\pm 10\%$, 输出信噪比的变化不到 0.1dB。此特性可为其他系统参数选取提供很大的方便。

5 存在定时误差时的接收性能

通过以上分析,我们确定了最佳的相关频率为 3.1GHz 和相关窗宽度 0.5ns。在此条件下,仿真了系统在不同定时偏差情况下的性能,其结果绘于图 9。作为对比,图中还给出了匹配滤波器的性能。从图中可以看出,在不存在定时误差的条件下,本方法性能要比匹配滤波器差 0.8dB 到 2.3dB(具体取决于相关窗的宽度)。但是当定时误差逐渐增大时,匹配

滤波器接收性能迅速下降。而同时正交正弦相关接收机的性能基本保持不变。在定时误差大于 20ps 时,最优的正交正弦相关接收的性能就超过匹配滤波器接收了。可见采用正交正弦相关接收方案可以大大降低系统对定时误差的敏感程度,这个特点使得采用此方案的接收机实现难度很大程度地降低了。考虑到匹配滤波器方案在较大定时误差时的糟糕表现,正交正弦相关接收带来的性能损失也是可以接受的。

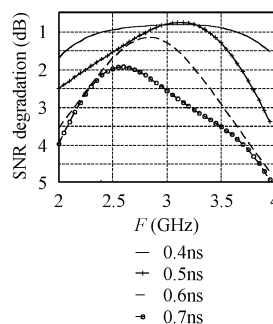


图 8 不同窗宽条件下的信噪比损失与相关频率的关系

Fig.8 The relation between SNR loss and correlation frequency with different window width

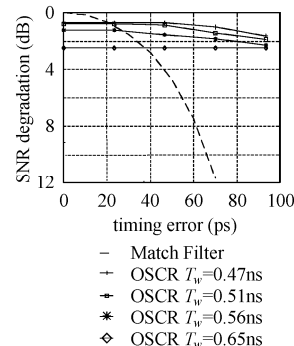


图 9 存在定时误差时正交正弦相关接收和匹配滤波器接收性能

Fig.9 The performance of OSCR and match filter receiver with timing error

6 结束语

本文通过分析 UWB 系统接收脉冲的特性,提出了一种正交正弦相关接收方案来完成对 UWB 系统中特有的极窄脉冲的接收。此方案能够很好地适应多径环境中的脉冲接收。文中并对系统参数的选取作了有效的分析,确定了最佳参数组合,并通过定性分析和计算机仿真说明了此方案具有很强的鲁棒性,在存在定时误差甚至是比较大的定时误差情况下,依然能够有效工作。虽然系统复杂度有所提升,但这个代价是值得的。

参 考 文 献

- [1] Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wide-band Transmission. Federal Communications Commission, 1st Rep. And Order, 2002.
- [2] 沈凤麟,等. 信号统计分析基础. 合肥:中国科学技术大学出版社,1989,第六章.
- [3] Win M Z, Scholtz R A. Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications. *IEEE Trans. on Comm.*, 2000, COM-48(4): 679-691.
- [4] Lovelace W M, Townsend J K. The effects of timing jitter and tracking on the performance of impulse radio. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(9): 1646-1651.
- [5] Tian Zhi, Giannakis G B. BER sensitivity to mis-timing in correlation-based UWB receivers. *GLOBECOM 2003*, San Francisco, USA, Dec. 2003, vol.1: 441-445.
- [6] Forgac J, Farkas P. Analysis of different UWB systems with

- timing jitter and ISI in AWGN channel. SympoTIC 2003, Bratislava, Slovakia, Oct. 2003: 51–54.
- [7] Guvenc I, Arslan H. Performance evaluation of UWB systems in the presence of timing jitter. IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, Reston, USA, Nov. 2003: 136–141.
- [8] Lee Sangyoub. Design and analysis of ultra-wide bandwidth impulse radio receiver. [Ph.D Thesis]. University of South California, 2002: 28–37.
- [9] Klein A G, Johnson Jr C R. MMSE decision feedback equalization of pulse position modulated signals. IEEE Conference on Communications, Paris, France, Jun. 2004: 2648–2652.
- [10] Zhao Shiwei, Liu Huaping, Tian Zhi. A decision-feedback autocorrelation receiver for pulsed ultra-wideband systems. IEEE Radio and Wireless Conference, Atlanta, USA, Sept. 2004: 251–254.
- [11] Han Seungyoun, Woo Choong Chae, Hong Daesik. UWB interference cancellation receiver in dense multipath fading channel. IEEE Vehicular Technology Conferences, Milan, Italy, May 2004: 1233–1236.
- 黄 屹: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为无线通信、移动通信.
- 尹华锐: 男, 1973 年生, 讲师, 主要研究方向为无线通信.
- 卫 国: 男, 1959 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为个人通信与移动通信.
- 朱近康: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为扩频通信、个人通信、移动通信、无线通信.