

UWB 扩频通信技术研究¹

黎海涛 徐继麟* 张平 张靖*

(北京邮电大学 92 信箱 北京 100876)

*(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要 该文首先介绍了采用超宽带 (UWB) 信号实现扩频通信的工作原理, 然后分析了接收信号处理方式, 并从理论上推导出表征系统性能的误比特率和最大接入用户数, 最后进行了数值仿真计算. 研究结果表明, UWB 通信是一项很有发展潜力的高速无线接入技术.

关键词 超宽带 (UWB), 扩频, 误比特率 (BER), 信号处理

中图分类号 TN914.4

1 引言

近年在短距离 (家庭与小型办公室) 无线通信技术领域提出了个人局域网 (PAN) 的概念. PAN 的核心思想是用无线电或红外线代替传统的有线电缆, 组建个人化的信息网络. 实现的 PAN 技术主要有: 蓝牙 (Bluetooth), IrDA (Infrared Data Association), Home RF 以及超宽带 (Ultra-Wideband Radio: UWB) 等 4 种. 其中 UWB 的高性能和低功耗的优点使得它成为未来最富有竞争力的技术之一.

一般的通信系统中, “宽带”是指具有大的调制带宽或高的数据传输速率, 而 UWB 是指发射信号的分数带宽 (带宽与中心频率之比) 大于 0.25, 如持续时间为纳秒级的冲击信号, 也称为基带信号、无载波信号^[1]. 它的带宽很宽, 频谱常从直流延伸到 GHz 量级, 所以具有高分辨、低截获、信息含量大和能探测隐蔽目标等优点. 这种信号首先在雷达中得到应用. 随后, Scholtz^[2] 把超宽带信号应用于扩频通信中, 提出了冲击无线电 (Impulse Radio: IR) 这一新概念. 它是发射一组无载波冲击脉冲序列 (ns 级), 通过伪随机码跳时扩频, 用该脉冲串承载的数字信息进行脉冲位置调制 (PPM), 从而实现超宽带通信. IR 技术具有以下优点: 工作频带宽使得系统接入用户数多; 不同路径时延的多径分辨率下降到 ns 量级, 故对信道衰落不敏感; 发射信号功率谱密度低; 用快速恢复光电二极管来产生冲击信号的复杂度低等. UWB 通信尤其适用于室内等密集多径场所的高速无线接入. 作为一种新近提出和发展的无线通信技术, 本文将首先讨论它的工作原理, 然后分析系统的性能特点, 最后进行数值仿真计算.

2 跳时脉位调制信号

在 UWB 通信中, 采用脉冲位置调制 (PPM) 对信号进行调制, 扩频方式采用跳时 (TH) 扩频. 这时, 第 k 个用户发射的 TH-PPM 信号表示为^[2]

$$s_k(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \omega(t - jT_f - c_j^k T_c - \delta d_{[j/N_s]}^k) \quad (1)$$

式中 j 是发射脉冲个数, T_f 是脉冲重复周期, $\{c_j^k\}$ 是第 k 个用户的 PN 序列, 数字调制时, N_s 是每个信息符号发射的冲击脉冲数, 数据符号 $\{d_{[j/N_s]}^k\}$ 是由 0 和 1 组成的二元符号流. 图 1 示出了发射的第 j 个脉冲信号 (设传送数字信息 “1”).

为进一步理解信号的物理意义, 把 $s_k(t)$ 分成 3 部分来讨论.

(1) 脉冲序列 $\sum_{j=0}^{\infty} \omega(t - jT_f)$, 它由重复时间为 T_f 的冲击脉冲组成, 脉冲重复时间典型值为脉冲时宽的一百 ~ 千倍, 故信号循环周期低.

¹ 2000-12-27 收到, 2001-07-18 定稿

电科院资助项目 (基金号: 7.4.5.1) 和东南大学移动通信国家重点实验室开放基金资助项目

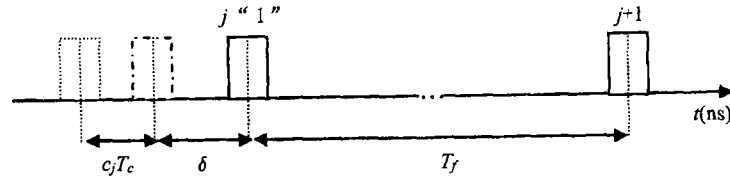


图 1 发射信号

(2) 伪随机跳时码. 为区别不同用户和消除用户间的碰撞, 对每个用户的发射信号通过赋给不同的跳时序列 $\{c_j\}$ 来获得不同的脉冲时移. 跳时码周期为 N_p , 即 $c_{j+iN_p} = c_j$, 码元取值范围为 $0 \leq c_j \leq N_h$. 跳时码给每个脉冲附加时移 T_c , 对第 j 个脉冲, 时移范围为 $0 \leq c_j^k T_c \leq N_h T_c$. 因跳时码周期为 N_p , 故脉冲 $\sum_j \omega(t - jT_f - c_j T_c)$ 的周期为 $T_p = N_p T_f$, 相应信号功率谱密度的谱线间隔从 $1/T_f$ 减小到 $1/T_p$, 使信号频谱更为平坦, 从而降低了发射信号功率谱.

(3) 数据调制. 用户 k 发射的数据序列 $\{d_{[j/N_s]}^k\}$ 是二元数字信息, 每个信息符号发射 N_s 个冲击脉冲. $[j/N_s]$ 是调制脉冲 j 的系数, $[\cdot]$ 表示取整, 每 N_s 个脉冲代表一个符号, 当数据 $d = 0$ 时, $\delta d_{[j/N_s]}^k = 0$, 脉冲无附加时移, 当数据 $d = 1$ 时, $\delta d_{[j/N_s]}^k = \delta$, 脉冲有附加时移 δ . 在这种调制方式下, 单个符号持续时间 $T_s = N_s T_f$, 信息传送速率 $R_s = 1/T_s = 1/(N_s T_f)$.

可见, 在 IR 信号中, 通过伪码跳时实现扩频多址, 采用脉位调制传输信息, 实现了 UWB 扩频通信.

3 接收信号处理

为简化分析, 设发射信号在自由空间信道传播, 系统有 N_u 个接入用户, 则接收信号为

$$r(t) = \sum_{k=1}^{N_u} A_k s_k(t - \tau_k) + n(t) \quad (2)$$

式中 A_k 表示信号通过传播路径到达接收机处的幅度衰减, τ_k 是传播时延, $n(t)$ 是功率谱为 $N_0/2$ 的加性白高斯噪声. 不失一般性, 假设待判决的是目的用户 “1”, 则

$$r(t) = A_1 s_1(t - \tau_1) + n_{\text{tot}}(t) \quad (3)$$

式中总噪声 $n_{\text{tot}}(t) = \sum_{k=2}^{N_u} A_k s_k(t - \tau_k) + n(t)$, 其中 $\sum_{k=2}^{N_u} A_k s_k(t - \tau_k)$ 为多址干扰 (MAI) 噪声. 在相干接收条件下, 接收机是作一个假设判断问题

$$H_d : r(t) = A_1 \omega_r(t - \delta d) + n_{\text{tot}}(t) \quad (4)$$

式中 $\omega_r(t) = \sum_{j=iN_s}^{(i+1)N_s-1} \omega(t - jT_f - c_j^1 T_c - \tau_1)$ 是每个脉冲时间间隔内的信号, 这里需判断 d 是 0 或 1. 用于与 $r(t)$ 匹配接收的参考信号为

$$v(t) = \omega_r(t) - \omega_r(t - \delta) \quad (5)$$

接收机判决 “ $d = 0$ ” 条件是 $\alpha = \int r(t)v(t) dt > 0$. 即

$$\sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{\tau_1+jT_f}^{\tau_1+(j+1)T_f} r(t)v(t - \tau_1 - jT_f - c_j^1 T_c) dt > 0 \quad (6)$$

可见, 统计量 α 是参考信号与不同时延的接收信号相关输出之和. 严格地说, 在多用户环境中, 多址干扰噪声并不是高斯分布, 因此 (6) 式的判决规则并不是最优接收算法. 但充分利用所有用户的信息实现最优检测的多用户检测将导致复杂的接收机设计, 故当用户数足够大时, 可合理假设其多址干扰近似为高斯分布. 这时, (6) 式作为一种简单的次最优检测算法, 具有实际应用价值.

4 系统性能分析

首先分析系统的误比特率. 基于检测算法 (6) 式的系统误比特率为

$$P_e(N_u) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-x^2/2)}{\sqrt{2\pi}} dx \quad (7)$$

式中 $\text{SNR}(N_u)$ 为系统输出信噪比, 定义为 $\text{SNR}(N_u) = s_0^2/E(|n_0|^2)$. 把输出统计量重写为

$$\alpha = s_0 + n_0 \quad (8)$$

其中

$$s_0 = \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{\tau_1+jT_f}^{\tau_1+(j+1)T_f} \left[A_1 \sum_{i=0}^{N_s} \omega_r(t - \tau_1 - iT_f - c_i^1 - \delta) \right] v(t - \tau_1 - jT_f - c_j^1 T_c) dt \quad (9)$$

$$n_0 = \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{\tau_1+jT_f}^{\tau_1+(j+1)T_f} n_{\text{tot}}(t) v(t - \tau_1 - jT_f - c_j^1 T_c) dt \quad (10)$$

通过变量代换, (9) 式可简化为

$$s_0 = N_s A_1 m \quad (11)$$

式中 $m = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega_r(t - \delta) v(t) dt$.

(10) 式可进一步写为

$$n_0 = \sum_{k=2}^{N_u} A_k n_k + n_r \quad (12)$$

式中 MAI 噪声为

$$n_k = \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\sum_{i=-\infty}^{\infty} \omega_r(t - \tau_k + \tau_1 + jT_f + (c_j^1 - c_i^k) T_c - iT_f \delta) \right] v(t) dt \quad (13)$$

仿文献 [3] 的分析得到 n_k 的统计特性:

$$E(n_k) = 0, \quad E(|n_k|^2) = N_s \sigma_a^2 \quad (14)$$

其中 $\sigma_a^2 = T_f^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \omega_r(t-s) v(t) dt \right]^2 ds$. 接收机背景噪声

$$n_r = \sum_{j=0}^{N_s-1} \int_{\tau_1+jT_f}^{\tau_1+(j+1)T_f} n(t) v(t - \tau_1 - jT_f - c_j^1 T_c) dt \quad (15)$$

其均值为零, 方差为 σ_r^2 . 根据上面的推导可得

$$E(|n_0|^2) = \sigma_r^2 + N_s \sigma_a^2 \sum_{k=2}^{N_u} A_k^2 \quad (16)$$

把 (11) 式和 (16) 式代入 SNR 定义中, 得到当仅有一个接入用户和 N_u 个用户时的信噪比

$$\text{SNR}(1) = \frac{(N_s A_1 m)^2}{\sigma_r^2}, \quad \text{SNR}(N_u) = (N_s A_1 m)^2 / \left(\sigma_r^2 + N_s \sigma_a^2 \sum_{k=2}^{N_u} A_k^2 \right) \quad (17)$$

根据输出信噪比 $\text{SNR}(N_u)$, 可以得到系统误比特率 $P_e(N_u)$.

下面分析系统容量. 在扩频通信系统中有统一的信噪比表达式^[4]

$$\text{SNR}(N_u) = \left[\frac{1}{\text{SNR}(1)} + M \sum_{k=2}^{N_u} \left(\frac{A_k}{A_1} \right)^2 \right]^{-1} \quad (18)$$

式中 M 是调制系数, 由 (17) 式知, 在 UWB 通信方式中 $M = \sigma_a^2 / (N_s m^2)$.

定义 $\Delta p = 10 \log_{10} [\text{SNR}(1) / \text{SNR}(N_u)]$, 它表示第一个用户受其他 $N_u - 1$ 个用户多址干扰影响而使输出信噪比降低, 在功率控制良好的情况下, 即 $A_k = A_1$, 由 (18) 式可得

$$N_u(\Delta p) = \lfloor M^{-1} \text{SNR}^{-1}(N_u) [1 - 10^{-(\Delta p/10)}] \rfloor + 1 \quad (19)$$

它是 Δp 的单调递增函数, 故系统最大接入用户数为

$$N_u(\Delta p) \leq \lim_{\Delta p \rightarrow \infty} N_u(\Delta p) = \lfloor M^{-1} \text{SNR}^{-1}(N_u) \rfloor + 1 = N_{\max} \quad (20)$$

可见, UWB 扩频通信系统中容纳的用户数存在上限. 把 (20) 式改写为

$$N_{\max} - 1 = M^{-1} / \text{SNR}(N_u) \quad (21)$$

与扩频通信系统容纳用户数^[5]

$$N_{\max} - 1 = (W/R) / (E_b/I_0) \quad (22)$$

相比较, 其表达式相似, 可以把 M 理解为单位扩频带宽内的信息传输速率.

5 数值仿真结果与结论

在 IR 中, 接收到的冲击单脉冲信号可建模为^[2]

$$\omega(t) = [1 - 4\pi(t/t_n)^2] \exp[-2\pi(t/t_n)^2] \quad (23)$$

数值仿真时选取典型信号参数如下: 冲击脉冲时宽 $t_n = 0.29\text{ns}$, 重复周期 $T_f = 100\text{ns}$, $\delta = 0.16\text{ns}$, 图 2 是接收到的冲击脉冲波形. 由信号参数可计算出 $m^2 = 0.0305$, $\sigma_a^2 = 0.006$. 设传输速率 $R_s = 19.2\text{kbps}$, 即每个符号的周期 $T_s \approx 52\mu\text{s}$, 则每个符号包含的脉冲数 $T_s/T_f = 521$, 调制系数 $M = 3.8 \times 10^{-6}$. 若系统功控良好, 即 $A_k = A_1 (k = 2, \dots, N_u)$, 且 $\text{SNR}(1) = 10\text{dB}$, 可以计算出不同接入用户数 (N_u) 对应的误比特率 (P_e), 如图 3 所示, 可以看到, 随着接入用户数增加, 系统误比特率也增大.

超宽带通信技术推广了超宽带信号的应用领域, 即从单纯的雷达应用拓宽到无线通信技术里. 超宽带通信技术的一大优点是发射功率很低, 它几乎不释放电磁波, 从这点上看, 它与 TDMA, CDMA 等现行的通信方式不同, 具有使无线电资源得到高效利用的优势. 同时, 也应看到在实际应用中, 还有一些具体问题尚待解决, 如高的时间分辨率增加了同步精度; 要求良好的功率控制; 接收机设计较复杂; 可考虑采用 RAKE 接收机才能捕获到足够的信号能量等, 解决这些技术难题需要做进一步研究.

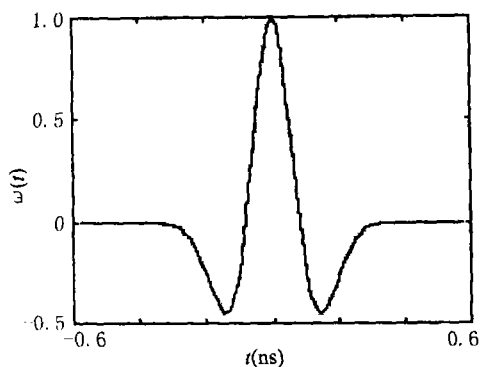


图2 接收到的冲击信号

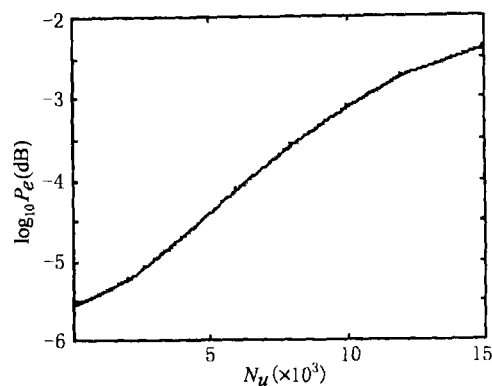


图3 不同用户数的误比特率

参 考 文 献

- [1] C. L. Bennett, G. F. Ross, Time-domain electromagnetics and its applications, Proc. IEEE., 1978, 66(3), 299-318.
- [2] R. A. Scholtz, Multiple access with time-hopping impulse modulation, In Proc. of MILCOM'93, Montreal, Oct. 1993, 447-450.
- [3] M. Z. Win, R. A. Scholtz, Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications, IEEE Trans. on COM., 2000, COM-48(4), 679-691.
- [4] G. R. Cooper, R. W. Nettleton, A spread spectrum technique for high capacity mobile communication, IEEE Trans. on VT, 1978, VT-27(11), 264-275.
- [5] J. G. Proakis, Digital Communication, 3rd ed., New York, McGrawHill, 1995, chapter13.

STUDY ON UWB SPREAD SPECTRUM COMMUNICATION
TECHNIQUE

Li Haitao Xu Jilin* Zhang Ping Zhang Jing*

*(P.O.Box 92, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876, China)***(Institute of Electronic Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)*

Abstract In this paper, the operating principle of UWB spread spectrum communication technique is described first, then the receiver signal processing is analyzed, the multiple access performance: BER and the number of users that system can support is evaluated. The numerical results is presented. These studies indicate that UWB has potential capability in the field of high speed wireless access in dense multipath environments.

Key words Ultra-wide bandwidth, Spread spectrum, Bit-error rate, Signal processing

黎海涛: 男, 1972年生, 博士后, 目前从事移动通信方面的研究, 已发表论文20余篇。

徐继麟: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 长期从事雷达系统与信号处理等方面的研究工作, 在国内外发表论文百余篇, 获部、省级科研成果五项。

张平: 男, 博士, 教授, 博士生导师, 在国内外发表70多篇学术论文, 目前主持中国第三代移动通信系统的研究工作。

张靖: 女, 1975年生, 电子科技大学博士生, 从事第三代移动通信技术的研究。