

多径多用户环境下超宽带脉冲无线通信系统性能¹

黎海涛 张靖* 陆建华

(清华大学电子工程系 北京 100084)

*(中国电子科技集团电子科学研究院系统工程总体部 北京 100041)

摘 要 超宽带脉冲无线电是正在发展中的新型高速无线接入技术, 该文首先分析了超宽带发射信号实现多址通信的原理。为了研究在多径环境下的系统性能, 引入了确定型两径和统计型 S-V 两种典型室内信道模型。通过仿真试验得到在此信道条件下系统的误比特率。结果表明, 在多径多用户环境下, 符号间干扰和多址干扰使系统性能下降; 当接入用户数达到一定值后, 多址干扰成为降低系统性能的主要因素; 采用接收天线分集能提高系统性能。

关键词 超宽带, 多径信道, 分集, 多址干扰, 符号间干扰

中图分类号 TN914, TN92

1 引言

超宽带 (Ultra WideBand, 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^[1]。UWB 技术首先在雷达领域得到实际应用, 并开创了超宽带雷达这一新分支。90 年代初, 有学者开始研究 UWB 信号在无线通信中的应用, 并提出了脉冲无线电 (Impulse Radio, IR) 这一新概念^[2], 以此实现在无线信道中的超宽带传输。之后, 国内外许多学者都对 UWB 技术在宽带高速无线通信中的应用潜力进行研究。

众所周知, 一般通信方式是把信号从基带调制到载波上, 所谓宽带通信是指具有大的调制带宽或高的数据传输速率。相反, UWB-IR 是对具有很陡上升和下降时间的时域短脉冲进行直接调制。超宽带技术开发了一个具有吉赫兹带宽和最高空间容量的无线信道。同时, 具有对信道衰落不敏感; 发射信号功率低, 有低截获能力; 脉冲持续时间短, 易实现分组传输; 信息含量大; 系统复杂度低; 能提供数厘米的定位精度等优点。UWB-IR 能在不占用现有频率资源的情况下带来一种全新的通信方式。

在室内环境下, 多径衰落是一大障碍, 多径传播造成严重的符号间干扰 (ISI), 同时, 多用户通信时还存在用户间的干扰, 即多址干扰 (MAI), 它们影响到 UWB-IR 系统性能。故需要对 UWB-IR 在多径多用户通信环境下的性能深入研究, 以更精确地预测 UWB 系统性能和优化收发信机设计。文中第 2 节分析了利用 UWB 信号实现多址通信的原理, 第 3 节描述了两径和统计型 S-V 这两种典型室内信道模型, 第 4 节研究了在接收端的相关处理和分集接收算法, 最后进行了仿真试验。

2 TH-PPM 发射信号

实现超宽带通信的首要任务是产生 UWB-IR 发射信号, 目前较成熟的是对发射短脉冲进行脉冲位置调制 (PPM) 和跳时 (TH) 扩频的跳时脉位调制 (TH-PPM) 信号。第 k 个用户发射的 TH-PPM 信号可表示为^[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 个用户的跳时 PN 序列, T_c 为码片时间, 数据符号 $\{d_{[j/N_s]}^k\}$ 是由 0 和 1 组成的二元符号流, $[j/N_s]$ 是调制脉冲 j 的系数,

¹ 2002-05-29 收到, 2002-12-18 改回

国家自然科学基金项目资助 (资助号: 60132010)

$[\cdot]$ 表示取整, N_s 为每个符号包括的脉冲数. 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 的短脉冲组成, 脉冲重复时间典型值为脉冲时宽的 100~1000 倍.

(2) 伪随机跳时码. 对每个用户的发射信号通过赋给不同跳时序列 $\{c_j\}$ 来获得不同的脉冲时移, 即对脉冲进行时间编码形成多址信道. 跳时码 c_j 从有限集 $\{0, 1, \dots, N_h\}$ 中选取, 故时移范围从 0 到 $N_h T_c$. 编码序列提供了脉冲另外的时移, 使得这些脉冲在时间上以伪随机间隔分布, 产生多个码道. 这与一般的直接序列扩频不同, 其单个比特未经扩频序列调制, 扩频带宽是直接产生, 本质上是时域概念.

(3) 数据调制. 用户 k 传送的数据序列 $\{d_{[j/N_s]}^k\}$ 是二元数字信息, 每个信息符号发射 N_s 个脉冲, 即每 N_s 个脉冲代表一个数据符号. 当数据 $d = 0$ 时, $\delta d_{[j/N_s]}^k = 0$, 脉冲无时移; 当数据 $d = 1$ 时, $\delta d_{[j/N_s]}^k = \delta$, 脉冲有时移 δ . 在这种调制方式下, 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 UWB-IR 信号中, 通过伪码跳时扩频实现多址, 采用脉位调制方式传输信息, 实现了超宽带通信.

3 多径信道模型

UWB-IR 一般用于室内等多径场所, 多径信道对系统性能的影响很大, 下面分别对两种典型室内多径信道模型进行分析.

3.1 两径模型 文献 [3] 给出的确定性两径信道模型如图 2, 它包括直达波和非直达波两条传播路径. 传播路径距离之差近似为 $\Delta d = d_2 - d_1 \approx 2h_1 h_2 / d$, 其中 d_1, d_2 分别代表直达波和非直达波的传播距离, d 是接收、发射机间距离, 收、发天线高度分别为 h_1, h_2 , 故直达、非直达波之间的时延差为 $\Delta t = 2h_1 h_2 / (cd)$, c 为光速.

3.2 多径统计模型 Saleh 等提出一种室内多径传播的统计模型 (文中称为 S-V 模型)^[4]. 该模型基于从试验数据观测到的电波传播聚类现象, 即在一个观测时间窗内, 电磁射线分成几组到达, 把每组称为一束, 每个射线束包括若干传播射线. S-V 模型的信道脉冲响应建模为

$$h(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{kl} \delta(t - T_l - \tau_{lk}) \quad (2)$$

式中 β_{lk} 表示复增益, 其幅度服从瑞利分布, 相位服从均匀分布. 其均方值为

$$\beta_{lk}^2 = \beta^2(T_l, \tau_{lk}) = \beta^2(0, 0) \exp(-T_l/\Gamma) \exp(-\tau_{lk}/\gamma) \quad (3)$$

$\beta^2(0, 0)$ 为第一个射线束内第一条射线的平均功率, Γ 是射线束到达衰减时间常量, γ 是射线到达衰减时间常量, T_l 为第 l 束到达时间, τ_{lk} 为第 l 束内射线 k 的到达时间. 把每束内第一

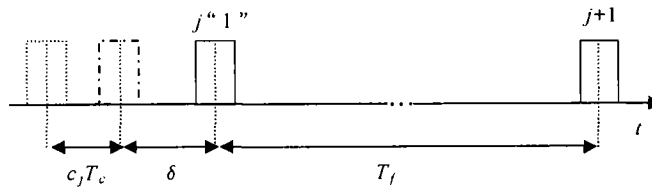


图 1 发射信号

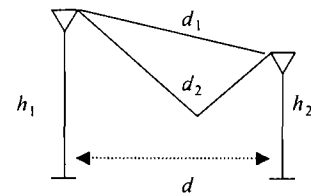


图 2 两径信道模型

条射线到达时间定义为射线束到达时间, 它建模为到达速率 Λ 的 Poisson 过程, 其转移概率服从指数分布

$$p(T_l|T_{l-1}) = \Lambda \exp[-\Lambda(T_l - T_{l-1})], \quad l > 0 \quad (4)$$

设在每射线束内, 射线以速率 λ 到达, 同样可建模为 Poisson 过程, 转移概率为

$$p(\tau_{lk}|\tau_{l(k-1)}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_{lk} - \tau_{l(k-1)})], \quad k > 0 \quad (5)$$

可见, S-V 模型由射线平均功率, 射线束到达时间和射线达到时间等决定。

4 接收信号处理

4.1 相关处理 UWB-IR 在接收端采用最佳匹配的相关处理。设发射信号经过多径信道传播后到达接收端的信号为

$$r(t) = \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{p=1}^P A_{k,p} s_{k,p}(t - \tau_{k,p}) + n(t) \quad (6)$$

式中 N_u 为系统接入用户数, $A_{k,p}$ 表示第 k 个用户发射信号经过第 p 条传播路径后的幅度衰减, $\tau_{k,p}$ 是传播时延, $n(t)$ 为加性白高斯噪声。不失一般性, 设待判决的是目的用户“1”, 则

$$r(t) = \sum_{p=1}^P A_{1,p} s_{1,p}(t - \tau_{1,p}) + n_{\text{tot}}(t) \quad (7)$$

式中总噪声 $n_{\text{tot}}(t) = \sum_{k=2}^{N_u} \sum_{p=1}^P A_{k,p} s_{k,p}(t - \tau_{k,p}) + n(t)$, 其中 $\sum_{k=2}^{N_u} \sum_{p=1}^P A_{k,p} s_{k,p}(t - \tau_{k,p})$ 为多址干扰。在相关接收条件下, 用于与 $r(t)$ 匹配接收的参考信号为

$$v(t) = \omega(t) - \omega(t - \delta) \quad (8)$$

接收机判决“ $d = 0$ ”条件是^[5]

$$\alpha = \int r(t)v(t) > 0 \quad (9)$$

反之, 则判为“ $d = 1$ ”。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 (9) 式的判决规则并不是最优接收算法。但当用户数足够大时, 可合理假设 MAI 近似为高斯分布^[5]。这时, (9) 式作为一种简单的次最优检测算法, 具有实际应用价值。

4.2 接收分集 在多径信道中, 利用分集技术, 选择两个或两个以上的信号, 可以提高接收端的瞬时信噪比, 从而大大降低多径衰落的影响, 提高无线通信系统性能。文献 [6,7] 研究了在 UWB-IR 中采用 RAKE 接收的时间分集可提高衰落信道中数据传输性能, 本文将研究采用天线 (空间) 分集对系统性能的影响。

设在 UWB-IR 系统中采用接收分集技术, 即发送端采用一副发射天线, 接收端采用多副接收天线。在接收端获得 M 条相互独立的支路信号后, 通过合并技术来得到分集增益。通常采用的合并技术有选择式合并、等增益合并和最大比合并三种。选择式合并 (SC) 是采用 M 个接收支路中选择具有最高基带信噪比的支路信号作为输出。最大比合并 (MRC) 是根据各支路信噪比 (SNR) 来对 M 路信号进行加权, SNR 大的支路加权值大, SNR 小的支路加权值小, 再对各路信号同相相加。等增益合并 (EGC) 是对每支路选择相等的加权值 1, 然后把各支路信号同相后叠加。

5 仿真结果

仿真时选取信号参数如下: 短脉冲时宽 $t_n = 0.29\text{ns}$, 重复周期 $T_f = 20\text{ns}$, 时移 $\delta = 0.16\text{ns}$, 传输速率 $R_s = 5\text{Mbps}$, 符号时间 $T_s = 1/R_s = 200\text{ns}$, 每符号包括的脉冲数 $N_s = T_s T_f^{-1} = 10$. 在两径信道模型中, 以其中一条传播路径 d_1 为基准, 另一传播路径 d_2 相对它的增益和时延分别为 -0.3 和 4 . 在统计信道模型中, 选择射线束数为 12, 每束内射线数为 12, $1/\Lambda = 2\text{ns}$, $1/\lambda = 1/2\text{ns}$, $\gamma = 5\text{ns}$, $\Gamma = 33\text{ns}$.

理想的发射时域脉冲一般建模为高斯型信号, 接收单脉冲信号可建模为^[6]

$$\omega_r(t) = [1 - 4\pi(t/t_n)^2] \exp[-2\pi(t/t_n)^2] \quad (10)$$

发射、接收脉冲分别如图 3 和图 4 所示.

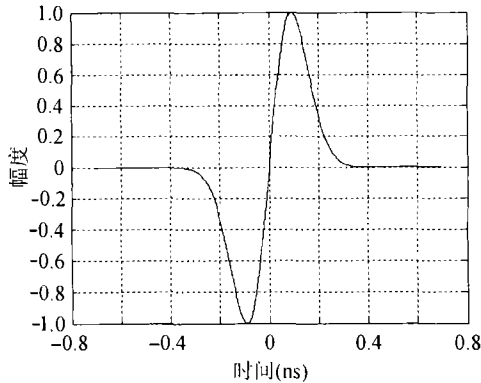


图 3 发射短脉冲

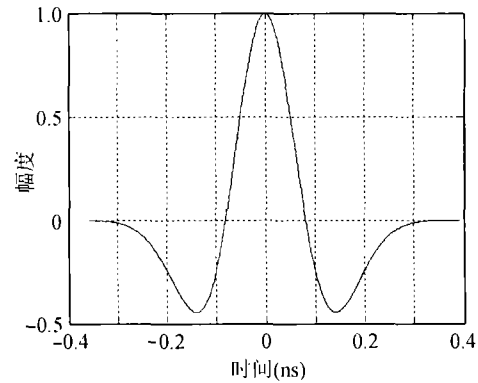


图 4 接收脉冲

为比较 UWB-IR 系统在不同信道环境中的性能, 对 AWGN、确定型两径和统计型 S-V 这三种信道模型下的系统误比特率 (BER) 性能进行了仿真。图 5 是 AWGN 信道条件下的系统 BER。可以看到, 当系统接入用户数到达一定值后, 随 SNR 的增加, BER 的提高不明显。这表明, 当用户数增多时, MAI 成为影响系统性能的主要因素。

图 6 示出了在确定型两径信道模型下, 系统的 BER 性能。图 7 是统计型信道模型下系统的 BER 性能。与 AWGN 信道相比, 多径信道下系统性能下降, 且统计型多径模型下性能下降更大, 这是因为多径传播给系统带来的严重的 ISI, ISI 使系统性能变差。同时, 从这三种信道条件下的仿真结果可以看出, 当系统接入用户数到达一定值后, 即使 SNR 增加, BER 变得平缓, 这时 MAI 成为影响系统性能的主要因素。图 8 是当用户数为 15, 采用两根接收天线时, 系统的 BER, 可看到接收分集使 UWB-IR 的性能得到提高。

UWB-IR 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。它与 TDMA、CDMA 等现行的通信方式不同, 具有使无线频率资源得到高效利用的优势。在 UWB-IR 领域, 有着丰富的研究内容, 除了研究其系统性能外, 还包括 UWB 传播信道特性、多址方式, 与其它无线系统的兼容性问题, 这也是进一步的研究工作。

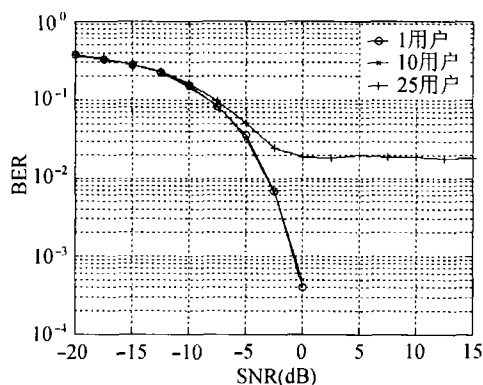


图 5 AWGN 下系统的 BER

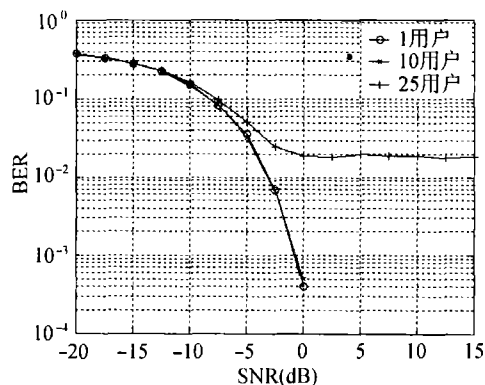


图 6 两径模型下系统的 BER

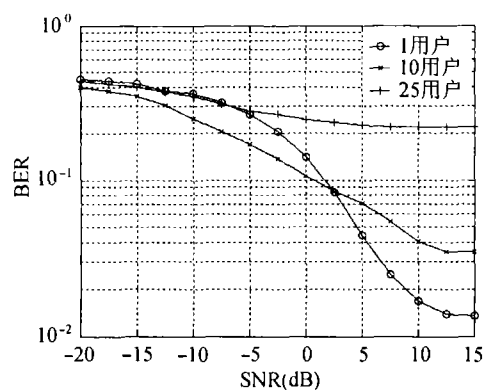


图 7 S-V 模型下系统的 BER

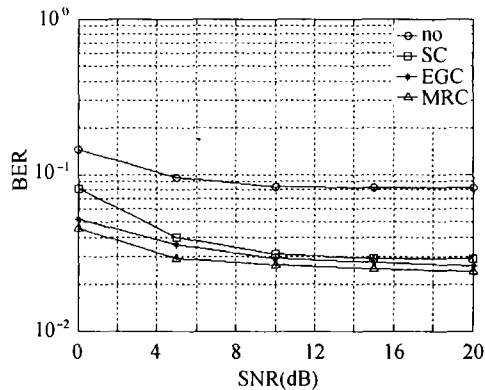


图 8 接收分集时系统的 BER

参 考 文 献

- [1] J. D. Taylor, Introduction to Ultra-Wideband Radar System, Florida: CRC Press, Inc., 1995, Chapter 1.
- [2] R. A. Scholtz, Multiple access with time-hopping impulse modulation, In Proc. of MILCOM'93, Montreal, Oct. 1993, 447-450.
- [3] K. Siwiak, Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communication, Boston, MA, Artech House, 1995.
- [4] A. A. M. Saleh, R. A. Valenzuela, A statistical model for indoor multipath propagation, IEEE JSAC, 1987, 5(2), 133-137.
- [5] Moe Z. Win, R. A. Scholtz, Impulse Radio: How it works, IEEE Communications Letters, 1998, 2(1), 36-38.
- [6] Moe Z. Win, R. A. Scholtz, On the energy capture of ultrawide bandwidth signals in dense multipath environments, IEEE Communications Letters, 1998, 2(9), 245-247.
- [7] R. Jean-Marc Cramer, Moe Z. Win, R. A. Scholtz, Impulse radio multipath characteristics and diversity reception, IEEE ICC, Atlanta, Georgia, 1998, 1650-1654.

PERFORMANCE OF ULTRA-WIDEBAND IMPULSE RADIO
WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM IN
MULTIPATH AND MULTIUSER ENVIRONMENTS

Li Haitao Zhang Jing* Lu Jianhua

(Dept. of Electronic Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

**(Academy of Electronic and Information Technology,
China Electronic Technology Group Corporation, Beijing 100041, China)*

Abstract Ultra-wideband impulse radio is a developing high speed wireless access technology. In this paper, the principle of ultra-wideband multiaccess communication is analyzed with the transmitting signal. In order to study the system performance in multipath channels, the deterministic two-path model and the statistical S-V model are employed for evaluating the bit error rates of the system by simulation. The results indicate that the intersymbol interference and multiple access interference are the main factors that degrade the system performance, which, on the other hand, may be improved by antenna diversity.

Key words Ultra wideband, Multipath channel, Diversity, Multiaccess interference, Inter-symbol interference

黎海涛: 男, 1972 年生, 博士, 从事无线网络多媒体通信研究.

张 靖: 女, 1975 年生, 博士, 从事自适应信号处理的研究.

陆建华: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线多媒体通信.