

相位编码扩谱 OCDMA 系统性能分析

左 超, 马文华, 濮宏图, 林金桐
(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘 要: 相位编码扩谱光码分多址(OCDMA)通信系统是近年来 OCDMA 研究的热点之一. 本文建立了采用相位掩模板的相位编码扩谱 OCDMA 通信系统理论模型, 分析了系统性能. 数值结果表明: 较长的码字和短的初始脉冲有利于提高系统性能.

关键词: OCDM; 相位编码扩谱; 相位掩模

中图分类号: TN914.53 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2002)04-0457-03

Performance Analysis on Spectral Encoded Spreading OCDMA System

ZUO Chao, MA Wen hua, PU Hong tu, LIN Jin tong

(Optical communication center, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Phase encode spreading optical code division multiplex access (OCDMA) communication system is one of the research focuses in recent years. We have established the system model of such OCDMA system basing on phase mask and analyzed its performance. The calculated result shows that longer code length and shorter initial optical pulse width will lead to better system performance.

Key words: OCDM; spectral encode; phase mask

1 引言

光码分多址(OCDMA)通信系统作为一种扩展频谱系统, 所有用户同时共享光纤中的所有带宽, 能够提供灵活的异步多址接入方式. 因此, 在未来的超高速全光通信网和实时计算机通信系统中, 光码分多址通信系统将会扮演重要角色^[1]. OCDMA 技术目前主要集中在以下几个研究方向: 直接扩时编码^[1], 脉冲位置编码^[2], 频域相位、振幅编码扩谱^[3], 以及跳频编码^[4]技术等. 频域相位编码扩谱 OCDMA 技术采用非相干光源, 在频域对光脉冲的相位进行编码, 经扩谱后的光脉冲在时域上成为功率很低的伪随机光噪声信号, 接收端经相位解码后, 只有与发送端相同码字编码的光脉冲才能恢复为初始脉冲, 其余用户发送的光脉冲仍然为伪随机噪声信号, 称为多址干扰(MAI). 相位编码扩谱 OCDMA 技术目前进行了较多的实验研究, 单路传输速率可达 10Gb/s ^[5], 多路传输的研究正在展开^[6], 但在理论上缺乏统一的模型, 本文针对应用较多的采用相位掩模板的相位编码扩谱 OCDMA 技术, 建立理论模型, 分析其系统性能, 给出误码率计算公式.

2 系统基本原理

2.1 系统框图

OCDMA 通信系统的基本原理框图如图 1 所示. 其中, 不同的 OCDMA 通信系统采用不同的编/解码器方案, 例如, 单极性直接扩时 OCDMA 采用光纤延迟线、跳频 OCDMA 采用光

纤光栅等. 采用相位掩模板的相位编码扩谱 OCDMA 的编/解码器原理如图 2 所示.

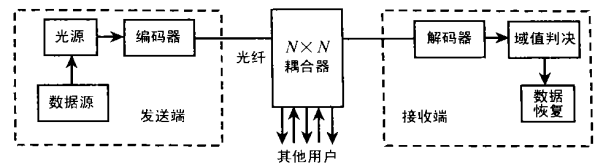


图 1 OCDMA 系统框图

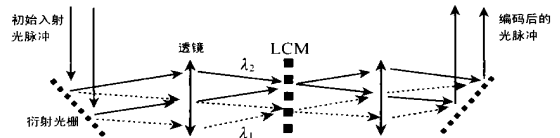


图 2 采用相位掩模板的相位编码扩谱 OCDMA 系统编解码器原理

宽带光脉冲经光栅衍射后, 不同的频率成分在空间上线性分开, 位于消色差透镜焦平面上的相位掩模板对不同位置的光频率进行随机相位编码(附加相位为 0 或 π), 编码后的光脉冲经第二个共焦消色差透镜和光栅后耦合进光纤进行传输. 解码器的结构与编码器相同. 其中相位掩模板是关键器件, 使用较多的是液晶调制器(LCM^[3], liquid crystal modulator).

2.2 数学模型

初始入射高斯光脉冲在时域的表达式为

$$f(t) = \exp(-t^2/2T_0^2) \quad (1)$$

式中 T_0 为初始脉冲半宽度, 经傅立叶变换后在频域为

$$F(\omega) = \sqrt{2\pi}T_0 \exp(-\omega^2 T_0^2/2) \quad (2)$$

我们选择频域振幅 $1/e$ 宽度 $\Delta\omega$ 进行相位掩模编码, 所采用的相位编码扩谱码字在频域内的表达式为

$$M(\omega) = \sum_{j=(F-1)/2}^{(F-1)/2} C_j \{ u[\omega - (j-1/2)\delta\omega] - u[\omega - (j+1/2)\delta\omega] \} \quad (3)$$

其中: $\delta\omega = \Delta\omega/F$, F 为码字长度; $u(x)$ 为阶跃函数; $C_j = \pm 1$, 与所选的具体码字有关. 编码后的光脉冲在时域的表达式为

$$\begin{aligned} f_1(t) &= F^{-1}[F(\omega)M(\omega)] = f(t) * F^{-1}[M(\omega)] \\ &= \sum_{j=(F-1)/2}^{(F-1)/2} C_j \frac{\delta\omega}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(t-\tau)^2/2T_0^2} Sa\left(\frac{\delta\omega}{2}\tau\right) e^{j\delta\omega\tau} d\tau \\ &\approx \frac{\delta\omega}{2\pi} \sum_{j=(F-1)/2}^{(F-1)/2} C_j Sa\left(\frac{\delta\omega}{2}t\right) e^{j\delta\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(t-\tau)^2/2T_0^2} d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

式中: F^{-1} 为傅立叶反变换, $*$ 为卷积符号; $Sa(x)$ 为抽样函数. 图 3 为选择 m 序列, $F=63$, 初始脉冲宽度 $T_0=1$ ps 经相位编码后的时域波形.

从相位编码扩谱后的时域表达式可以看出, 这种伪随机光噪声信号实质上是指函数经随机码字加权后在相位上的叠加, 其包络为抽样函数. 这里需要特别指出的是码字的选择, 直接扩频编码等其他 OCDMA 技术对码字的要求较高, 例如光正交码, 改进素数码等, 他

们均不能直接使用目前在无线 CDMA 领域已经较成熟的扩频码, 而相位编码扩谱 OCDMA 是在频域相位上对信号进行编码, 可以直接借鉴无线 CDMA 中的各种扩频码字.

在接收端, 相位掩模板对接收到的光信号进行模二加运算. 只有相位掩模板与发送端相同的用户才能正确解调发送的信息比特. 当采用 m 序列作为扩谱码字时, m 序列的自闭性, 即不同的 m 序列经模二加之后仍是 m 序列, 使得以下的计算大大简化.

仿照无线 CDMA 技术时域直接扩频对扩频谱宽度的衡量, 定义相位编码扩谱 OCDMA 时域扩频后波形的均方根脉宽

$$T_{\sigma} = [\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2]^{1/2} \quad (5)$$

来描述时域波形的宽度, 与无线 CDMA 发射端的频域滤波器相似, 在 OCDMA 发送端可以加时间窗来控制发送信号的宽度. 其中

$$\langle T^n \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{2\pi/\delta\omega}{2\pi/\delta\omega} T^n |f_1(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{2\pi/\delta\omega}{2\pi/\delta\omega} |f_1(t)|^2 dt} \quad (6)$$

式中: $\frac{2\pi}{\delta\omega}$ 是抽样函数包络的第一零点宽度, 扩谱信号的百分之九十能量集中在第一零点范围之内. 据式(4)计算可得

$$T_{\sigma} = \frac{T_0 F}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{1}{2F} \sum_{p=1}^{F-1} C_p C_q} \quad (7)$$

其中 $\sum_{p=1}^{F-1} C_p C_q$ 是所选码字的移一位非循环自相关, 对于 m 序列 $\sum_{p=1}^{F-1} C_p C_q$ 等于 0 或者 $-2^{[7]}$, 在码长 F 较大的前提下

$$T_{\sigma} \approx T_0 F / \sqrt{2} \quad (8)$$

因此, 展开后的时域波形的宽度与初始脉宽及所选码字长度成正比.

3 系统性能分析

首先假定所有用户经相位编码扩谱后所发送的光子流为严格平稳、各态历经随机过程. 具体到一个用户发送数据“1”时则为一个样本函数. 进一步从式(4)出发, 假定每一个样本函数的实部和虚部振幅的起伏是高斯分布, 这可以通过下面的 CDF^[8] (cumulative distribution function) 方法得到验证. 推导可得一个样本函数能量的起伏为指数分布

$$p(x) = \frac{1}{\sigma^2} e^{-x/\sigma^2} \quad (9)$$

式中 σ 为指数分布的参数. 图 4 是在样本函数的 T_{σ} 之内采用 CDF 方法得到的能量起伏的分布和指数分布的比较.

从图 4 以及图 3(b) 的自相关曲线可以看出, 这种假定是合理的. 事实上, 式(4)中, 展开后的时域波形是指函数经随机码字加权后在相位上的叠加, 叠加的波形个数是码长 F 个, 根据大数中心极限定理, 当 F 较大时, 样本函数的实部和虚部振幅的起伏是高斯分布. 通过以上的分析, 可以认为扩谱后的波形在时域上是一种伪随机光噪声信号, 这与无线 CDMA 中扩频后的伪随机噪声信号不同, 后者是在频域上的波形描述, 前者是对时域的描述, 但二者具有对应性.

根据伪随机信号理论, σ^2 应满足下式

$$\sigma^2 = \frac{\int_{-T_{\sigma}/2}^{T_{\sigma}/2} |f(t)|^2 dt}{2T_{\sigma}} \approx \frac{0.45}{\sqrt{2\pi}F} \quad (10)$$

对 σ^2 的计算做了如下的近似: 扩谱后的时域波形在包络的第一零点之内能量均匀分布, 即这种伪随机信号的起伏平坦.

在以下的分析中, 为了突出相位编码扩谱 OCDMA 技术的关键问题, 忽略了信道的损耗和非线性, 以及各种噪声, 并假定每个用户在接收端的光功率相同. 当一个干扰用户的概率密度分布函数为指数分布时, 相互独立的 n 个用户的概率密度分布函数为

$$p_n(x) = \frac{x^{n-1}}{\sigma^{2n}(n-1)!} e^{-x/\sigma^2} \quad (11)$$

当同时接入的用户数 N 较多时(计算表明 $N > 20$), 由中心极限定理, 式(11)可以近似为高斯分布

$$p_n(x) \approx N(n\sigma^2, n\sigma^4) \quad (12)$$

在接收端光电探测器接收到的能量 Y 为随机变量, 系统误码率为

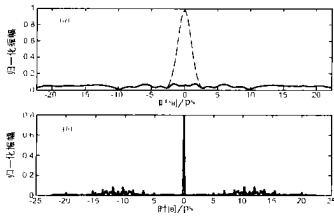


图 3 (a) 中虚线为初始脉冲波形, 同时也是经解码后恢复的波形, 实线为相位编码扩谱后的时域波形. (b) 为相位编码扩谱后时域自相关波形

$$P_b = \frac{1}{2} [Pr(Y > \theta | b_i = 0) + Pr(Y \leq \theta | b_i = 1)] \quad (13)$$

式中: θ 为检测阈值; b_i 是被期望用户所发送的信息比特。

$$Pr(Y > \theta | b_i = 0) = \sum_{i=1}^{N-1} \binom{N-1}{i} p^i (1-p)^{N-1-i} \cdot \int_{\theta}^{\infty} \frac{x^{i-1}}{\sigma^{2i} (i-1)!} e^{-x/\sigma^2} dx \quad (14)$$

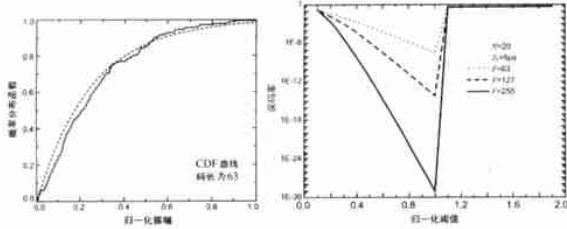


图 4 虚线为指数函数分布, 实线为在扩谱后时域波形均方根脉宽内采用 CDF 方法得到的能量起伏的概率分布函数

图 5 不同码长情况下归一化为在扩谱后时域波形均方根脉宽内采用 CDF 方法得到的能量起伏的概率分布函数

$p = 0.5 \times$ 占空比, 该占空比指时域扩开后的占空比, 在以下的计算中每个用户的传输速率均为 1Gb/s。式(13)中的第二项在归一化检测阈值小于 1 时为零, 否则满足下式

$$Pr(Y \leq \theta | b_i = 1) = \sum_{i=1}^{N-1} \binom{N-1}{i} p^i (1-p)^{N-1-i} \cdot \int_0^{\theta} \frac{(x-1)^{i-1}}{\sigma^{2i} (i-1)!} e^{-[(x-1)/\sigma^2]} dx \quad (15)$$

图 5 是归一化阈值误码率曲线, 分别对应不同的用户数和码长, 可以看出, 在码长、用户数和初始脉冲宽度一定时系统存在最佳阈值问题, 在忽略噪声等因素时, 最佳阈值为 1。

图 6 是不同码长情况下同时接入的用户数误码率曲线, 在初始脉冲宽度一定的前提下, 码长越长, 系统误码率越低, 这是由于码长越长, 扩开后的信号时间宽度越宽, 功率也就越低, 相应的 MAI 降低。

图 7 是不同初始脉冲宽度情况下同时接入用户数误码率曲线, 在码长一定的前提下, 初始脉冲宽度越窄, 误码率越低, 短的初始脉冲所含能量降低, 也会相应降低 MAI。

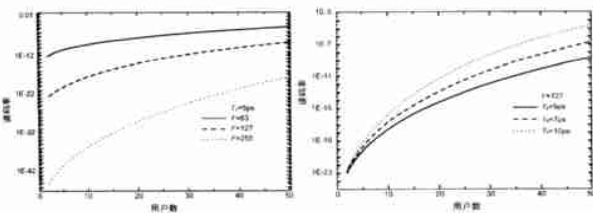


图 6 不同码长情况下同时接入的用户数误码率曲线。

图 7 不同初始脉冲宽度情况下同时接入用户数误码率曲线。

4 结论

本文建立了基于相位掩模板的相位编码扩谱 OCDMA 系统的数学模型, 每一个用户扩谱后的时域信号为相互独立的随机过程的样本函数, 其能量分布的概率密度函数为指数分

布, 当用户数较多时, MAI 的能量概率密度函数近似为高斯分布。扩谱后的时域波形的均方根脉宽与码字长度、初始脉宽成正比。数值计算的结果表明, 较长的码字和短的初始脉冲有利于提高系统性能, 这与目前实验的报道是一致的。目前, 相位编码扩谱 OCDMA 系统的理论模型还没有完善, 对扩谱码的选择以及信道、噪声对系统的影响仍是研究的热点问题。

参考文献:

- [1] P R Prucnal, M A Santoro, T R Fan. Spread spectrum fiber-optic local area network using optical processing [J]. J Lightwave Tech, 1986(LT-4): 547- 554.
- [2] H M H Shalaby. Direct detection optical overlapping PPM CDMA communication systems with double optical hardlimiters [J]. J Lightwave Tech, 1998, 17(7): 1158- 1165.
- [3] H P Sardesai, C C Chang, A M Weiner. A femtosecond code division multiple access communication system test bed [J]. J Lightwave Tech, 1998, 16(11): 1953- 1964.
- [4] L Tancevski, I Andonovic. Wavelength hopping/ time spreading code division multiple access systems [J]. Elect Lett, 1994, 30(17): 1388- 1390.
- [5] H Tsuda, et al. Spectral encoding and decoding of 10Gb/s femtosecond pulses using high resolution arrayed waveguide grating [J]. Elect Lett, 1999, 35(14): 1186- 1188.
- [6] S Shen, A M Weiner, G D Sucha, M L Stock. Bit error rate performance of ultrashort pulse optical CDMA detection under multi access interference [J]. Elect Lett, 2000, 36(21): 1795- 1796.
- [7] 杨义先. 最佳信号理论与设计 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [8] 藤本共荣, J R 詹姆斯. 移动天线系统手册 [M]. 杨可忠, 井淑华, 译. 北京: 人民邮电出版社, 1997.

作者简介:



左超 男, 1972 年生于山东济南市, 1994 年南京通信工程学院本科毕业, 1999 年国防科技大学硕士毕业, 现为北京邮电大学光通信中心博士研究生, 研究方向为高速全光通信网等。



马文华 男, 1975 年生于河南省三门峡市, 1999 年北京邮电大学硕士毕业, 现为北京邮电大学光通信中心博士研究生, 研究方向为高速光电子器件等。