

文章编号: 0258-7025(2003)05-0413-04

消光比在串扰分析中的影响

戴无惧¹, 张汉一¹, 何永琪²

(¹清华大学电子工程系, 北京 100084; ²大唐电信, 北京 100081)

摘要 导出了单一串扰情况下, 串扰光和系统光噪声共同存在时, 接收机输入光信号及其基带输出信号的表达式。阐述了信号光与串扰光的物理相干性与信号数字逻辑相关性。计算了在最优判决门限情况下, 背景误码率在 10^{-9} 条件时, 信号光消光比与串扰光消光比对系统误码率的影响。结果表明, 消光比在8~12 dB的范围内, 系统的误码特性接近最优。

关键词 光纤通信技术; 串扰; 消光比; 密集波分复用; 光噪声; 相干; 相关

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Effect of Extinction Ratio in the Analysis of Crosstalk

DAI Wu-jie¹, ZHANG Han-yi¹, HE Yong-qi²

¹Department of E&E, Tsinghua University, Beijing 100084, China
²DTT, Beijing 100081, China

Abstract In this paper, the expression formula for the total input electrical field of optical receiver in DWDM systems in the case of existence of optical noise and crosstalk, is deduced. The problem of physical coherence and digital logical correlation is stated in detail. The effect of optical extinction ratio for both signal and crosstalk on the system BER performance is calculated, as the background BER for the case of 10^{-9} due to optical noise only and optimal decision level are assumed. It is found that the extinction ratio is about 8~12 dB, while the system BER performance is optimal.

Key words fiber communication technique; crosstalk; extinction ratio; dense wavelength division multiplex; optical noise; coherent; co-related

随着单波长传输速率的提高和波长数的不断增多, 系统和网络中各种恶化因素对信息传输性能的影响也越发严重; 这些恶化因素中, 串扰尤需认真考虑。在以往的有关文献^[1~4]中, 密集波分复用(DWDM)系统的串扰分析主要集中于研究多重串扰在高斯分布近似条件下对系统误码特性的影响以及如何更精确地计算这种影响; 在这些文献中, 出于简化数学模型及其公式推导的需要, 都假设系统中信号光与串扰光的消光比都为理想值(即无穷大), 同时忽略系统中光噪声的影响。但是, 在实际的DWDM系统中, 所有光信号的消光比都是有限值(一般在8~15 dB左右), 而且由掺铒光纤放大器引入

的自发辐射光噪声也是不能忽略的。因此, 现有的很多关于串扰的理论分析与研究同实际系统情况有一定的差异。

针对单一串扰情况, 本文导出了串扰与光噪声共同作用下系统接收机接收信号与光探测器基带输出信号的表达式, 以此为基础对非理想消光比条件下, 光噪声与串扰对系统误码特性的共同影响中的作用进行了较为详细的分析和计算。

1 串扰与光噪声作用的数学描述

主要研究在单一串扰情况下消光比的作用。对

收稿日期: 2002-01-21; 收到修改稿日期: 2002-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 69990540)和863计划(编号: 863-300-01-01-99)资助项目。

作者简介: 戴无惧(1966-), 男, 清华大学电子工程系博士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: daiwuju98@mails.

于多重串扰的情况,不予涉及。

输入接收机的信号光场为

$$E_S = e \cdot E_S(t) \cos[\omega_S t - \varphi_S(t)] \quad (1)$$

其中 $e \cdot$ 为信号光场的极化方向矢量, $E_S(t)$ 为信号光场振幅, ω_S 为信号光场角频率, $\varphi_S(t)$ 为信号光场相位角。

输入接收机的干扰光场为

$$E_I = e \cdot E_I(t) \cos[\theta(t)] \cos[\omega_I t - \varphi_I(t)] + e_{\perp} E_I(t) \sin[\theta(t)] \cos[\omega_I t - \varphi_I(t)] \quad (2)$$

其中 e_{\perp} 为与信号光场垂直的极化方向矢量, $E_I(t)$ 为串扰光场振幅, ω_I 为串扰光场角频率, $\varphi_I(t)$ 为串扰光场相位角, $\theta(t)$ 为串扰光场矢量与信号光场矢量的夹角,服从 $(0, \pi]$ 的均匀分布。

输入接收机的噪声光场为

$$E_N = (e + e_{\perp}) n_0(t) \cos[\omega_N t - \varphi_N(t)] \quad (3)$$

其中假设窄带噪声光场在两个相互垂直的极化方向上是等强度的, $n_0(t)$ 为一个极化方向上的噪声光场振幅,服从 $(0, \frac{1}{2} \sigma_N^2)$ 的高斯分布, ω_N 为噪声光场角频率, $\varphi_N(t)$ 为噪声光场相位角。

忽略光噪声自差拍和串扰 - 噪声差拍,并假设探测器响应度为 1,接收机光探测器的基带输出为

$$I(t) = \frac{1}{2} E_S^2(t) + \frac{1}{2} E_I^2(t) + E_S(t) n_0(t) \cos[\Delta \varphi_{S-N}(t)] + E_S(t) E_I(t) \cos[\theta(t)] \cos[\Delta \varphi_{S-I} + \Delta \varphi_{S-I}(t)] \quad (4)$$

式中第一项为信号,第二项为串扰,第三项为信号 - 噪声差拍,第四项为信号 - 串扰差拍,第五项为串扰 - 噪声差拍。 $\Delta \omega_{S-I} = \omega_S - \omega_N$ 为信号 - 噪声角频率差, $\Delta \varphi_{S-I}(t) = \varphi_S(t) - \varphi_I(t)$ 为信号 - 串扰的载波相位差(服从 $(0, \pi)$ 均匀分布)。一般情况下,信号 - 噪声差拍可视为零均值高斯过程,均方为 $\alpha_N P_S$ 。其中 P_S 为信号光平均功率, P_I 为串扰光平均功率, α_N 为窄带光噪声均方根值。

在同源串扰的情况下,信号光与串扰光在物理上存在着相干与非相干的问题,在数字信号发送序列的逻辑关系上存在着相关与不相关的问题。对于同源相干且相关串扰,串扰光只是信号光的一个经历微小传输时延差的克隆,两者的相对时延小于一个发送信号码元间隔,在数字发送逻辑的关系上是相关的,同时在这时由于两者的光程差几乎可以忽略,故信号光与串扰光的相位是相同的,即物理上是相干的。对于同源相干但非相关串扰,串扰光相对于信号光的传输光程差小于发送激光器的相干长

度,但相对时延差大于一个发送码元间隔,这时由于伪随机扰码器的作用,信号光与串扰光是不相关的。显然,即使来自同一个信源,两个物理不相干的光场信号在数字逻辑上也是不相关的。在一般研究多重串扰的影响时,都是根据中心极限定理,在串扰光数目比较大时,采用高斯分布来逼近串扰光场的概率联合分布情况。但是,这样处理必须有两个前提:1)串扰光与信号光是物理不相干的;2)各个串扰光之间在物理上是不相干的;否则按照高斯分布处理是有问题的。但 DWDM 光传送网中的串扰主要产生于光交叉互连节点,异源同频串扰间的相互关系是很难确定的;另外,现在 DWDM 系统中发送激光器的相干长度都在百米以上,而光交叉连接节点中由于器件与光纤连线引入的光程差却很小(基本上为米量级),故同源串扰在物理上相干的可能性很大。

同频串扰时,接收机光探测器的基带输出为

$$I(t) = \frac{1}{2} E_S^2(t) + \frac{1}{2} E_I^2(t) + E_S(t) n_0(t) \cos[\Delta \varphi_{S-N}(t)] + E_S(t) E_I(t) \cos[\theta(t)] \cos[\Delta \varphi_{S-I}(t)] \quad (5)$$

其中,同源相干且相关串扰情况下

$$I(t) = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{C})^2 E_S^2(t) + (1 + \sqrt{C}) E_S(t) n_0(t) \cos[\Delta \varphi_{S-N}(t)] \quad (6)$$

同源相干但非相关串扰情况下

$$I(t) = \frac{1}{2} E_S^2(t) + \frac{1}{2} C E_S^2(t - \tau) + E_S(t) n_0(t) \cos[\Delta \varphi_{S-N}(t)] + \sqrt{C} E_S(t) E_S(t - \tau) \cos[\Delta \varphi_{S-I}(t)] \quad (7)$$

式中 τ 为串扰光路相对于信号主光路的时延差, $C = P_I/P_S$ 为串扰功率抑止比。在上述推导中忽略了串扰信道中的光噪声和接收机自身的热噪声。

2 误码率计算与结果分析

2.1 误码率计算公式

系统传输信号为“0”,“1”二电平信号,且等概率分布,采用 IM-DD 调制解调。

同频串扰时的误码率(BER)

$$BER = \frac{1}{2} [P_e("1" | "0") + P_e("0" | "1")] \quad (8)$$

式中, $P_e("1" | "0")$, $P_e("0" | "1")$ 分别为信号发送传号而被判为空号的概率、信号发送空号而被判为传号的概率。由公式(5)可知,在判决时刻($t = t_0$),

接收机基带输出信号为

$$I(t_0) = \frac{1}{2} E_S^2(t_0) + \frac{1}{2} E_I^2(t_0) + E_S(t_0) n_0(t_0) \cos[\Delta \varphi_{S-N}(t_0)] + E_S(t_0) E_I(t_0) \cos(\theta) \cos(\varphi) \quad (9)$$

其中, $\theta = \theta(t_0)$ 为判决时刻信号光与串扰光的极化方向夹角, $\varphi = \Delta \varphi_{S-N}(t_0)$ 为判决时刻信号光与串扰光的载波相位差。由于光噪声, θ, φ 相互之间是概率无关的, 则由概率论相关定理^[5] 可得

$$P("1" | "0") = \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{I_{th}} f_{\theta}(\theta) f_{\varphi}(\varphi) f_N(x) dx d\theta d\varphi = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \left[\int_0^{I_{th}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha_{1^*}}} e^{-\frac{[I(t_0)-x]^2}{2\alpha_{1^*}}} dx \right] d\theta d\varphi = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \operatorname{erfc} \left[\frac{I(t_0) - I_{th}}{\sqrt{2}\alpha_{1^*}} \right] d\theta d\varphi \quad (10)$$

式中 $f_{\theta}(\theta) = 1/\pi$ 为 θ 的概率密度函数, $f_{\varphi}(\varphi) = 1/\pi$ 为 φ 的概率密度函数, $f_N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha_{1^*}}} e^{-\frac{[I(t_0)-x]^2}{2\alpha_{1^*}}}$ 为

传号时的信号-噪声差拍的概率密度函数, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数。同理有

$$P("0" | "1") = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \operatorname{erfc} \left[\frac{I_{th} - I(t_0)}{\sqrt{2}\alpha_{0^*}} \right] d\theta d\varphi \quad (11)$$

其中, α_{1^*} 和 α_{0^*} 分别是信号光为传号与空号时的信号-噪声差拍的均方根, I_{th} 为接收机判决门限(取最优判决门限 $I_{th} = (P_{S, "1^*"} \alpha_{0^*} + P_{S, "0^*"} \alpha_{1^*}) / (\alpha_{0^*} + \alpha_{1^*})$, $P_{S, "1^*}$ 和 $P_{S, "0^*}$ 分别是信号光为传号与空号时的平均功率)。为简要起见, 不再一一列出同源相干且相关串扰和同源相干但非相关串扰时的误码率计算公式, 它们可根据以上公式很简单地导出。

2.2 计算结果

计算中, 作为背景参考的光噪声功率大小取在无串扰时系统误码率达到 10^{-9} 时的值, 并考虑了在无串扰时信号光消光比对误码率的影响, 因此计算结果仅表征存在串扰时消光比对误码率的影响。

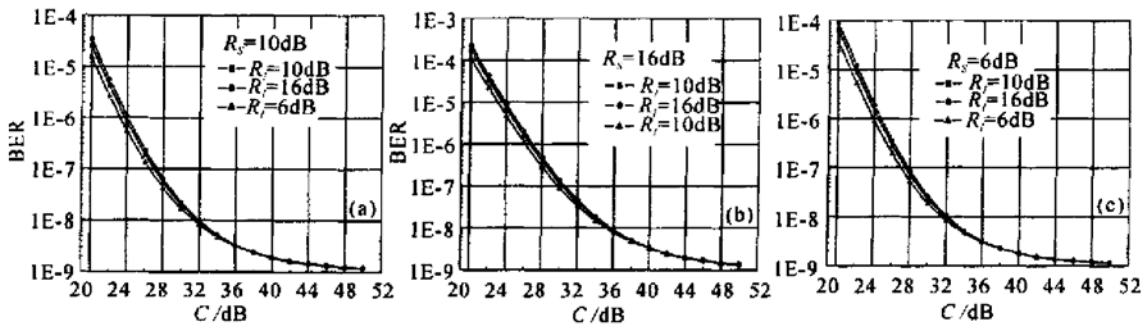


图1 同频异源串扰源串扰 BER~ C 结果

Fig.1 BER~ C result for co-frequency different-source crosstalk

对于同频非同源串扰, 不同信号光消光比和串扰光消光比情况下的串扰抑止比与误码率的计算结果见图 1(a)~(c) (图中 R_t 为串扰光消光比); 串扰抑止比为 30 dB 时, 不同信号光消光比和串扰光消光比情况下的误码率的计算结果见图 2。可以看出, 这时无论串扰光的消光比是多少, 信号光的消光比在 7~10 dB 时, 系统误码特性最好。

对于同源相干且相关串扰, 不同信号光消光比和串扰光消光比情况下的串扰抑止比与误码率的计算结果见图 3; 不同信号光消光比和串扰抑止比情况下的误码率的计算结果见图 4。显然, 这种情况下信号光与串扰光是同相叠加的, 而且比特序列一致, 其结果是传号时接收机基带输出更加高于判决门限, 而串扰主要来自空号时的叠加(它使接收机基带输出向判决门限靠近), 因而消光比越好, 串扰中空号的影响越

小。

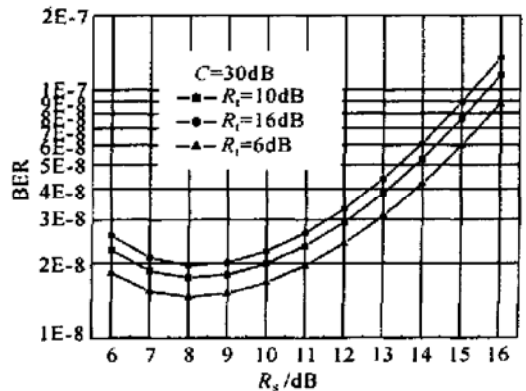


图2 C = 30 dB 时同频异源串扰 BER~ R_s 结果

Fig.2 BER~ R_s result for co-frequency different-source crosstalk and C = 30 dB

对于同源相干但非相关串扰,不同信号光消光比和串扰光消光比情况下的串扰抑止比与误码率的计算结果见图5;不同信号光消光比和串扰抑止比情况下的误码率的计算结果见图6。图中显示信号光的消光比在9~13 dB时,系统误码特性最好,而且随串扰抑止比的变化而变化。

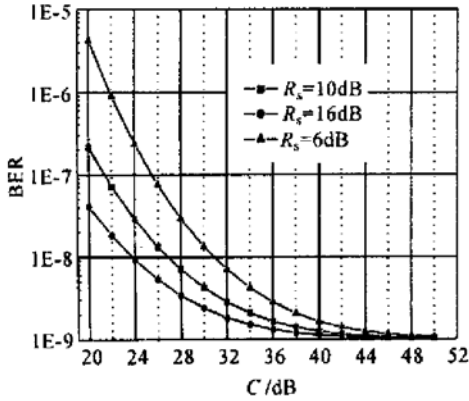


图3 同源相干且相关串扰 BER~ C 结果

Fig.3 BER~ C result for co-source coherent crosstalk

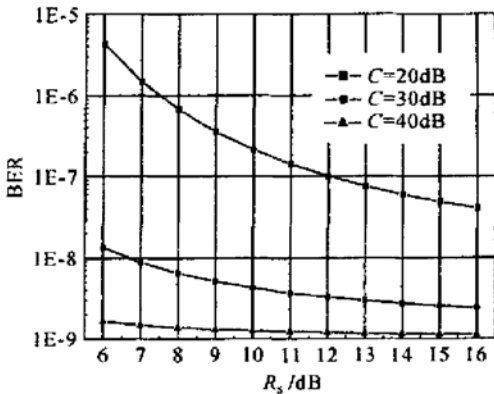


图4 同源相干且相关串扰 BER~ R_s 结果

Fig.4 BER~ R_s result for co-source coherent crosstalk

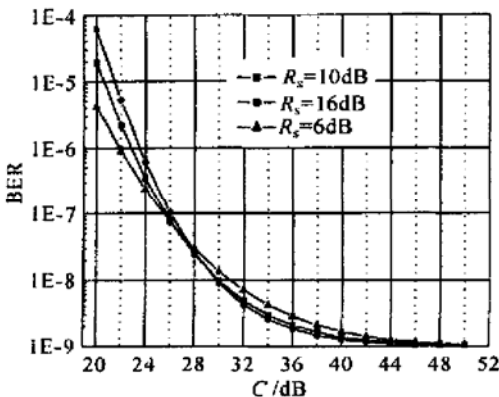


图5 同源相干但非相关串扰 BER~ C 结果

Fig.5 BER~ C result for co-source coherent non correlated crosstalk

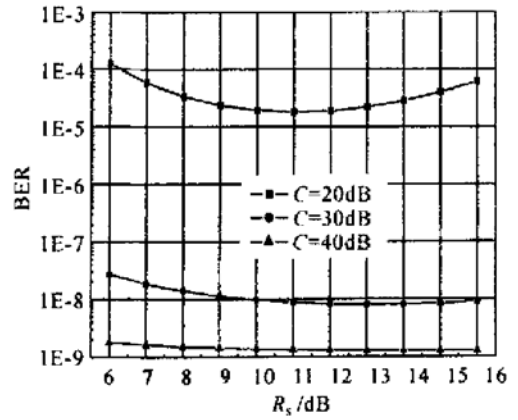


图6 同源相干但非相关串扰 BER~ R_s 结果

Fig.6 BER~ R_s result for co-source coherent non correlated crosstalk

3 结论

由计算结果可知,对于单一串扰的情况,采用最优判决门限时,信号光的消光比并非越高越好。这是由于在采用最优判决门限时,传号(“1”的误码率)和空号(“0”的误码率)在无串扰时几乎是相同的;随着信号光消光比的增加,传号功率在增加,其抗串扰能力在增强,传号误码率得到改善;但与此同时空号功率在减小,其抗串扰能力被削弱,空号误码率在恶化;当消光比增大到某个值以后,传号误码率的改善量小于空号误码率的恶化量,总体误码率出现恶化。考虑到 DWDM 系统,一个波长信道中的信号光也可以成为系统中自身和其他同波长信道的串扰光这一因素;再加上一般情况下出现同源相干且相关串扰的可能性不大,更多的串扰是异源同频串扰和同源相干但非相关串扰,我们认为 DWDM 系统中的消光比在8~12 dB之间比较合适,这时信号光受串扰的影响相对较小,而对其他信号光的影响也相对较低。

参考文献

- 1 Keang-Po Ho. Analysis of homodyne crosstalk in optical networks using granr charlier series [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(2): 149~ 154
- 2 S. L. Danielsen, C. Joergensen, B. Mikkelsen et al.. Analysis of interferometric crosstalk in optical switch blocks using moment generating functions [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, 10(11): 1635~ 1637
- 3 Yunfeng Shen, Kejie Lu, Wanyi Gu. Coherent and incoherent crosstalk in WDM optical networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(5): 759~ 764
- 4 H. Takahashi, K. Oda, H. Toba. Impact of crosstalk in an arrayed-waveguide multiplexer on N x N optical interconnection [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, 14(6): 1097~ 1105
- 5 A. Papoulis. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes [M]. 3rd Ed., McGraw-Hill, Inc., 1991