

1×7 圆柱形混合棒塑料光纤耦合器中的串扰及其功率代价¹

杨 春 孙小菡 王云明 张明德 丁 东

(东南大学电子工程系 南京 210096)

摘 要 研究 1×7 圆柱形混合棒塑料光纤耦合器 (CMRC) 中由于混合棒端面反射造成的结构性串扰, 建立不同误码率条件下串扰与功率代价的关系。串扰与功率代价的关系表明, 在误码率为 10^{-9} 的条件下, 1×7 CMRC 的串扰小于 -20dB 时其功率代价接近于零。实验制作了 1×7 CMRC, 测得其端口间串扰为 -23.5dB。为了进一步降低 1×7 CMRC 的串扰, 试验了在混合棒的失配面上涂覆光吸收介质的方法。测量结果表明该方法可以使串扰降低 5dB。

关键词 耦合器, 塑料光纤, 混合棒, 串扰, 功率代价

中图分类号 TN253

1 引 言

近年来, 塑料光纤作为一种高性能价格比的传输介质用于宽带局域网已成为国内外的研究热点^[1-2], 用于塑料光纤互连网的塑料光纤耦合器的研究正陆续见于报道^[3-7]。在以前的研究中, 我们提出了一种使用圆柱形混合棒的 1×7 塑料光纤耦合器 (CMRC: Cylindrical Mixing-Rod Coupler), 其耦合效率接近与传统的使用圆锥形混合棒的 1×7 塑料光纤耦合器, 1×7 CMRC 直接使用粗塑料光纤制作混合棒从而省略了加工难度大、成本高的混合棒拉锥过程, 因而生产成本显著降低, 但使用圆柱形混合棒也带来了结构性的通道串扰。

本文研究了 1×7 CMRC 的结构性串扰及其功率代价, 建立了结构性串扰与误码率和功率代价 (power penalty) 的关系。实验制作了 1×7 CMRC 并测量了串扰, 试验采用在混合棒端面涂覆光吸收介质以减小结构性串扰的方法。

2 耦合器的结构和性能

2.1 1×7 圆柱形混合棒耦合器

图 1 为 1×7 CMRC 的结构简图, A 端是一根芯径为 ϕ_S 的塑料光纤, B 端是由 7 根塑料光纤组成的光纤束, 位于耦合器中间的是用作为圆柱形混合棒的一段粗塑料光纤, 其数值孔径与塑料光纤一致, 芯径 $\phi_L = 3\phi_S$ 。混合棒 A 端横截面上未接光纤的阴影区域, 称为混合棒的失配面。

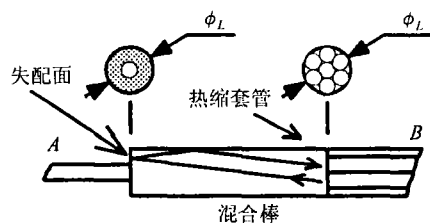


图 1 1×7 圆柱形混合棒耦合器 CMRC 的结构简图

¹ 2000-11-24 收到, 2001-04-05 定稿

国家自然科学基金 (编号: 60007005) 和国家 95 重点科技攻关项目 (编号: 95-720-22-01) 资助

光信号从耦合器 B 端第 i 端口输入混合棒并向 A 端传播时, 由于 A 端失配面的菲涅耳反射, 部分光信号被反射回 B 端并耦合入其它端口, 从而形成串扰。该串扰是由于使用圆柱形混合棒造成的, 称为 1×7 CMRC 的结构性串扰。

若由 B 端第 i 端口输入的光功率为 P_i , 其中耦合入 B 端第 j 端口的光功率为 P_j , 则端口间串扰 ε 为

$$\varepsilon = P_j / P_i = \varepsilon_s + \varepsilon_c \quad (1)$$

式中 ε_s 表征由混合棒 A 端失配面的菲涅耳反射造成的结构性串扰。 ε_c 表征由混合棒内部的散射以及混合棒与光纤芯连接界面的散射等其它因素造成的串扰。

1×7 CMRC 的结构性串扰与 A 端失配面的面积、失配面的光反射系数以及混合棒 B 端的耦合效率有关。若混合棒 A 端失配面外介质的折射率为 n_0 , 混合棒的纤芯折射率为 n_1 , 则混合棒 A 端失配面的光功率反射系数可近似表示为 $[(n_1 - n_0)/(n_1 + n_0)]^2$ 。光在混合棒中传输过程中进行模式耦合, 从而使模式功率分布趋于均匀。若混合棒出射端面的模式功率呈均匀分布, 则入射混合棒 A 端失配面的光功率与总光功率的比率为 $[1 - (\phi_S/\phi_L)^2]$, 混合棒 B 端单根光纤与混合棒的耦合效率为 $(\phi_S/\phi_L)^2$ [8]。因此 1×7 CMRC 端口间的结构性串扰可表示为

$$\varepsilon_s = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \left(\frac{\phi_S}{\phi_L} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\phi_S}{\phi_L} \right)^2 \right] \quad (2)$$

若混合棒 A 端失配面裸露在空气中, 则 $n_0 = 1.0$, 又若使用聚苯乙烯塑料光纤制作混合棒, 其纤芯折射率 $n_1 = 1.58$, 利用耦合器的几何结构关系 $\phi_L = 3\phi_S$, 根据 (2) 式计算端口间的结构性串扰为 $\varepsilon_s = -23.3\text{dB}$ 。

2.2 1×7 CMRC 的串扰对性能的影响

下面考察耦合器处于双向工作状态, B 端 1 个端口受其它 6 个端口串扰影响的功率代价。为便于表述, 将耦合器 B 端的 7 个端口任意编号为 $i = 1, \dots, 7$, 不妨考察第 7 端口受其它 6 个端口串扰影响的情况。

设从耦合器 B 端 $i = 1, \dots, 6$ 端口输入耦合器的光信号相互独立, “1” 码的平均光功率为 P_s , 则第 i 端口的光信号可表示为

$$P_i = P_s b(t), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (3)$$

$$b(t) = \begin{cases} 1, & \text{“1” 码} \\ 0, & \text{“0” 码} \end{cases} \quad (4)$$

设接收机的噪声电流 i_n 服从高斯分布, 则误码概率为 [9,10]

$$P_e = \frac{1}{2} Q \left(\frac{\mu_1 - I_{th}}{\sigma_1} \right) + \frac{1}{2} Q \left(\frac{I_{th} - \mu_0}{\sigma_0} \right) \quad (5)$$

$$Q(q) = \int_q^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2) dx \quad (6)$$

式中 μ_1 为 “1” 码的平均电流, σ_1^2 为 “1” 码电流的方差, μ_0 为 “0” 码的平均电流, σ_0^2 为 “0” 码电流的方差, I_{th} 为接收机系统的判决门檻电流。

2.2.1 不存在串扰时接收机误码率的表达式 设接收机的灵敏度为 k , 光源的消光比为 ∞ , 则 $\mu_1 = kP_s$, $\mu_0 = 0$, $\sigma_1^2 = \sigma_0^2 = \langle i_n^2 \rangle$, 符号 $\langle \cdot \rangle$ 表示平均值。若判决门檻电流 $I_{th} = \mu_1/2$, 由 (5) 式可得

$$P_e = Q \left(\frac{kP_s}{2\sqrt{\langle i_n^2 \rangle}} \right) \quad (7)$$

这里, 引入参数 q

$$q = \frac{kP_s}{2\sqrt{\langle i_n^2 \rangle}} = Q^{-1}(P_e) \quad (8)$$

2.2.2 存在串扰时接收机误码率的表达式 当考虑 1×7 CMRC 的端口间串扰时, 若要保持 B 端第 7 端口的误码率与没有串扰时相同, 从该端口输出的光信号功率需增大 β 倍, β 即功率代价。此时, 从第 i 端口串入被干扰端口的光功率 $P_{\varepsilon,i}$ 为

$$P_{\varepsilon,i} = \varepsilon \beta P_s b(t), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (9)$$

若 $b(t)$ 是参数为 λ 的泊松过程, 则 $P_{\varepsilon,i}$ 的数学期望和方差为

$$E(P_{\varepsilon,i}) = \lambda \varepsilon \beta P_s \quad (10)$$

$$D(P_{\varepsilon,i}) = \lambda(1 - \lambda)(\varepsilon \beta P_s)^2 \quad (11)$$

根据中心极限定理^[11], 并利用 (10) 和 (11) 式, 可得接收机在噪声电流 i_n 和 6 个端口串扰的联合作用下, 信号电流的统计量为

$$\mu'_0 = E(i_n) + \sum_{i=1}^6 E(kP_{\varepsilon,i}) = 6k\lambda\varepsilon\beta P_s \quad (12a)$$

$$\mu'_1 = E(i_n) + \sum_{i=1}^6 E(kP_{\varepsilon,i}) + E(k\beta P_s) = (1 + 6\lambda\varepsilon)k\beta P_s \quad (12b)$$

$$\sigma_0^2 = \sigma_1^2 = D(i_n) + \sum_{i=1}^6 D(kP_{\varepsilon,i}) = \langle i_n^2 \rangle + 6\lambda(1 - \lambda)(k\varepsilon\beta P_s)^2 \quad (12c)$$

若取判决门檻电流 $I_{th} = (\mu'_1 + \mu'_0)/2$, 则由 (5) 式和 (12) 式可得

$$P_e = Q\left(\frac{k\beta P_s}{2\sqrt{\langle i_n^2 \rangle + 6\lambda(1 - \lambda)(k\varepsilon\beta P_s)^2}}\right) \quad (13)$$

由 (7), (8), (13) 式解得功率代价 β 与 1×7 CMRC 端口间串扰 ε 的关系为

$$\beta = 1/\sqrt{1 - 24\lambda(1 - \lambda)q^2\varepsilon^2} \quad (14)$$

若“1”码和“0”码出现的概率相等, 则 $\lambda = 1/2$, 代入 (14) 式并在等式两边取对数得

$$\beta(\text{dB}) = -5\log_{10}(1 - 6q^2\varepsilon^2) \quad (15)$$

至此, (8) 和 (15) 式建立了不同误码率条件下 1×7 CMRC 端口间串扰 ε 与功率代价 β 的关系。图 2 是误码率分别为 1×10^{-6} , 1×10^{-9} , 1×10^{-12} 条件下, 1×7 CMRC 端口间串扰与功率代价的关系曲线。由曲线可见, 1×7 CMRC 的端口间串扰小于 -15dB 时, 造成的功率代价小于 1dB ; 端口间串扰小于 -20dB 时, 造成的功率代价接近于零。

根据前面利用 (2) 式得到的计算结果, 1×7 CMRC 端口间的结构性串扰为 -23.3dB , 小于 -20dB , 因此 1×7 CMRC 的结构性串扰的功率代价接近于零, 结构性串扰对系统误码率的影响甚微。

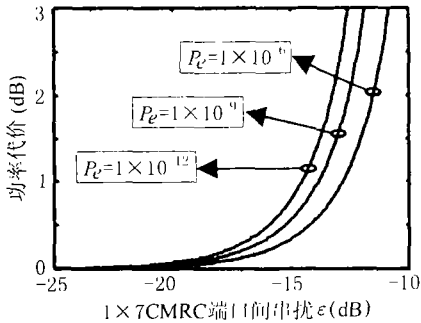


图 2 1×7CMRC 的端口间串扰与功率代价的关系

3 耦合器串扰测量与分析

实验中制作了 1×7 CMRC，并测量了耦合器的串扰。耦合器的分支光纤采用日本 Asahi Chemical 公司的 PMMA 阶跃塑料光纤，其纤芯直径 $\phi_s = 0.48\text{mm}$ ，混合棒采用南京玻璃纤维研究院提供的聚苯乙烯阶跃塑料光纤，其纤芯直径 $\phi_L = 1.48\text{mm}$ 。

表 1 列出了 1×7 CMRC 端口间串扰的测量数据，表中还列出了在混合棒 A 端失配面涂覆光吸收介质以降低串扰的实验数据。由表 1 可见，1×7 CMRC 实验样品的端口间串扰的平均值为 -23.5dB ，而其理论计算值为 -23.3dB ，可见 1×7 CMRC 的串扰主要由结构性串扰造成。由于 1×7 CMRC 的端口间串扰小于 -20dB ，根据图 2 的曲线可知，1×7 CMRC 串扰的功率代价接近零。另外，1×7 CMRC 实验样品的混合棒 A 端失配面涂覆光吸收介质后，端口间串扰约降低 5dB ，其相应的功率代价更小。

表 1 1×7 圆柱形混合棒塑料光纤耦合器 (CMRC) 的串扰性能

端口间串扰	1×7CMRC	
	A 端失配面裸露	A 端失配面涂吸收介质
最大值 (dB)	-23.0	-27.9
最小值 (dB)	-23.8	-28.3
平均值 (dB)	-23.5	-28.2
极差 (dB)	0.8	0.4
方差的平方根 (dB)	0.2	0.2

4 结 论

研究了 1×7 CMRC 中的结构性串扰及其功率代价，建立了 1×7 CMRC 的串扰与误码率、功率代价的理论公式。研究结果表明：在误码率为 10^{-9} 的条件下，1×7 CMRC 的端口间串扰小于 -20dB 时其功率代价接近于零。实验制作了 1×7 CMRC，测得其端口间串扰为 -23.5dB ，表明 1×7 CMRC 的端口间串扰可以达到 -20dB 以下。通过在 1×7 CMRC 混合棒的失配面上涂覆光吸收介质的方法，可以使端口间串扰约降低 5dB 。

参 考 文 献

[1] J. Cirillo, High speed plastic networks (HSPN): A new technology for today's application, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1996, 11(10), 10-13.

- [2] J. R. Cirillo, K. L. Jennings, M. A. Lynn, D. A. Messuri, R. E. Steele, Connection system designed for plastic optical fiber local area network, *Proc. of SPIE on Plastic Optical Fibers*, Mototaka Kitazawa, 1991, 1592, 53-59.
- [3] K. Inoto, H. Sano, M. Maeda, Plastic optical fiber star coupler, *Applied Optics*, 1986, 25(19), 3443-3447.
- [4] L. L. Blyler, JR., G. J. Grimes, Polymer optical mixing rod coupler, *IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1990, 13(1), 144-146.
- [5] Yao Li, Ting Wang, K. Fasanella, 4×16 polymer fiber optical array couplers, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(12), 1650-1652.
- [6] Yao Li, An overview of NECI projects on thin-cladding POF-based optical interconnects, *SPIE Conference on Optoelectronic Interconnects VI*, 3632, 1999, 70-77.
- [7] Jun Ai, Yao Li, Mixing-rod power coupling for large-core polymer optical fibers, *Opt. Eng.*, 1999, 38(6), 1024-1028.
- [8] J. M. Senior, *Optical Fiber Communications*, UK, Cambridge, Prentice Hall, 1992, 221-222.
- [9] L. G. James, N. K. Cheung, Effects of phase to intensity noise conversion by multiple reflections on gigabit-per-second DFB laser transmission systems, *J. of Lightwave Technology*, 1989, 7(6), 888-895.
- [10] J. M. Senior, *Optical Fiber Communications*, UK, Cambridge, Prentice Hall, 1992, 625-626.
- [11] 梁之舜, 邓集贤, 杨维权, 司徒荣, 邓永录编著, 概率论及数理统计 上册, 北京, 高等教育出版社, 1980 年, 第 1 版, 310-312.

POWER PENALTY OF CROSSTALK IN 1×7 CYLINDRICAL MIXING-ROD PLASTIC OPTICAL FIBER COUPLER

Yang Chun Sun Xiaohan Wang Yunming Zhang Mingde Ding Dong

(Dept. of Electronic Eng., Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Power penalty of crosstalk in 1×7 cylindrical mixing-rod plastic optical coupler (1×7 CMRC) is studied. Theoretical model on the relationship between inter-port crosstalk in 1×7 CMRC, power penalty and bit error rate (BER) is built. The model indicates that power penalty induced by the inter-port crosstalk under -20dB is insignificant and can be ignored. Experimental measurement of the 1×7 CMRC showing that the inter-port crosstalk is lower than -23dB , the inter-port crosstalk can be further lowered by about 5dB as the mismatched end-face of the mixing-rod is coated with optical absorb materials.

Key words Coupler, Plastic optical fiber, Mixing rod, Crosstalk, Power penalty

杨 春: 男, 1970 年生, 副教授, 研究方向为光纤通信和光纤传感器.

孙小茜: 女, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为光纤通信和物理电子学.

王云明: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为光纤通信.

张明德: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为光纤通信和物理电子学.

丁 东: 女, 1963 年生, 高级工程师, 研究方向为光纤通信和物理电子学.