

弱耦合多芯光纤芯间串扰分布特性

汪文杰^{1,2}, 仝科^{1,2}, 向练^{1,2*}¹苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006;²苏州大学光通信网络技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 基于功率耦合理论,对多芯干涉弱耦合多芯光纤(MCF)传输系统的光信号功率和芯间串扰(ICXT)特性进行了详细的研究,推导出相应条件下光信号功率及 ICXT 的解析表达式。研究发现,经过长距离的纵向传输之后,各纤芯中的光信号功率都将达到一个动态平衡的状态,并且提出了动态平衡归一化功率的计算公式。在多芯干涉 MCF 传输系统中,不同入射纤芯对耦合纤芯串扰的贡献是不相关的,耦合纤芯中 ICXT 的分布可以看成是多个双芯单输入 ICXT 分布的累加。基于串扰分布累加的特性,得到了多个经推广后的串扰评估数学模型,完善了多芯干涉情况下 ICXT 的分析理论,这可为该情形提供良好的理论分析工具。

关键词 光纤光学; 多芯光纤; 功率耦合理论; 多芯干涉; 芯间串扰; 空分复用

中图分类号 TN914

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0206002

Distribution Characteristics of Inter-Core Crosstalk in Weakly Coupled Multicore Fibers

Wang Wenjie^{1,2}, Tong Ke^{1,2}, Xiang Lian^{1,2*}¹ School of Electronic Information and Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;² Key Laboratory of Advanced Optical Communication Network Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract Based on the power coupling theory, the characteristics of optical signal power and inter-core crosstalk (ICXT) are studied in weakly coupled multicore fiber (MCF) transmission systems with multiple core interference. The corresponding analytical expressions of the optical signal power and ICXT are also derived. Simulation results show that, after long distance longitudinal transmission, the optical signal power in each core will reach a state of dynamic balance, and a calculation formula for the dynamic balance normalized power is proposed. Moreover, in the MCF transmission systems with multiple core interference, the ICXT contributions induced by different incident cores of the MCF are uncorrelated. The ICXT distribution in the coupled fiber core can be regarded as the accumulation of the ICXT of multiple dual-core single-input cores. Based on the cumulative characteristics of the ICXT, a number of generalized crosstalk estimation mathematical models are obtained, which improve the analysis theory of ICXT in the case of multiple core interference and provide a good theoretical analysis tool for this situation.

Key words fiber optics; multicore fiber; power coupling theory; multiple interference; inter-core crosstalk; space division multiplexing

收稿日期: 2021-06-21; 修回日期: 2021-07-20; 录用日期: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(61801322)、江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB510028)

通信作者: *lxiang@suda.edu.cn

1 引言

为了适应未来高速发展的光纤技术对通信容量、数据处理中心和无线电接入空分复用(SDM)网络的需求,基于 SDM 原理的多芯光纤(MCF)技术开始被广泛研究^[1-3]。多芯光纤中每个纤芯都可以看成是独立的传输通道,极大地增加了光纤传输系统的通信容量。然而,相比于传统单芯光纤,多芯光纤中独有的芯间串扰(ICXT)会严重影响光信号传输系统的质量、降低通信容量^[4]。ICXT 可以通过适当的结构设计手段来进行管理,比如通过增加芯间距离、提高相邻纤芯折射率之差或构建沟槽来降低 ICXT,从而提升系统的传输性能^[5-6]。

为了分析 MCF 传输系统的性能,对 ICXT 的评估和研究是至关重要的。在线性传播区域,耦合模理论和功率耦合理论为 ICXT 特性的研究提供了强大的理论基础^[7-9]。在非线性传播区域,为了研究 ICXT 的非线性效应,研究人员将 Manakov 方程推广到了 MCF 中^[10],并且在后续的研究工作中提出了用于 MCF ICXT 分析的线性和非线性统一理论模型^[11-12]。在弱耦合 MCF 中,针对串扰的理论研究主要集中在分析 ICXT 的平均功率演化、随频率和时间变化的特性以及光纤结构和外部条件引起的其他特性^[13-18]。基于耦合模理论,提出了一种适用于弱耦合 MCF 的通用半解析模型^[19]。研究结果表明,ICXT 的结果主要来自相位匹配点的贡献,并且该模型可以应用于实际弱耦合 MCF 的相位匹配区和非相位匹配区,极大地完善了 ICXT 评估的分析理论。为了更容易地评估 ICXT 特性,可以直接通过功率耦合理论对 MCF 中的串扰进行分析。Koshiha 等^[20]分别对耦合模方程和功率耦合方程的耦合模系数和功率耦合系数进行了重新定义,并且发现在弯曲 MCF 中,ICXT 在相位匹配区和非相位匹配区的统计特性并不相同。在得到对应的功率耦合方程及 ICXT 的评估表达式之后,研究人员开始广泛应用该公式,并将其应用在低串扰 MCF 的实验结果拟合中,在此基础上研究 MCF 的串扰问题^[21]。但是,目前已有的串扰特性研究大多基于单输入 MCF 传输系统,针对多输入 MCF 传输系统中串扰特性的研究工作少之又少^[22],还没有研究报告准确指出多芯干涉条件下光信号功率的变化趋势和 ICXT 的分布特性。

本文将基于功率耦合理论,研究多芯干涉条件下入射纤芯和耦合纤芯中光信号功率的变化趋势和

ICXT 的分布特性,推导出多种情形下光信号功率和 ICXT 的解析表达式。基于上述结果进行仿真验证,结果表明经过长距离的纵向传输之后,入射纤芯和耦合纤芯中的光信号功率将会趋于一致,达到一种动态平衡的状态,并且基于仿真结果提出了动态平衡归一化功率的计算公式。此外,对于多芯干涉传输系统,不同入射纤芯对耦合纤芯串扰的贡献是不相关的,耦合纤芯中 ICXT 的分布特性可以简化为多个双芯单输入 ICXT 分布的累加,并且基于累加的特性得到了多个推广后的串扰评估数学模型。

2 多芯干涉 MCF 基本原理

通常将可增强 MCF SDM 的能力且可实现同时在多个不同纤芯中传输光脉冲信号的系统称为多芯干涉 MCF 传输系统。在不考虑光纤损耗的前提下,传统 MCF 中的功率耦合方程可描述为^[8]

$$\frac{dP_m(z)}{dz} = \sum_{n \neq m} h_{mn}(z) [P_n(z) - P_m(z)], \quad (1)$$

式中:下标 m, n 分别为入射纤芯、耦合纤芯的标号; $P_m(z)$ 为入射纤芯 m 的平均功率; $P_n(z)$ 为耦合纤芯 n 的平均功率; $h_{mn}(z)$ 为入射纤芯 m 与耦合纤芯 n 之间的功率耦合系数。在实际弱耦合 MCF 中,受纵向随机弯曲、扭转和结构波动的影响,功率耦合系数 h_{mn} 是随机变化的。因此,为了便于求解功率耦合方程,可以使用平均功率耦合系数 \bar{h}_{mn} 来代替瞬时功率耦合系数,基于指数型自相关函数的平均功率耦合系数可表示为^[20]

$$\bar{h}_{mn} = \sqrt{2} K_{mn}^2 d_c \left[\frac{1}{\sqrt{a(b + \sqrt{ac})}} + \frac{1}{\sqrt{c(b + \sqrt{ac})}} \right], \quad (2)$$

$$a = 1 + \left(\Delta\beta_{mn} d_c - \frac{B_{mn} d_c}{R_b} \right)^2, \quad (3)$$

$$b = 1 + (\Delta\beta_{mn} d_c)^2 - \left(\frac{B_{mn} d_c}{R_b} \right)^2, \quad (4)$$

$$c = 1 + \left(\Delta\beta_{mn} d_c + \frac{B_{mn} d_c}{R_b} \right)^2, \quad (5)$$

$$B_{mn} = \sqrt{(\beta_m x_m - \beta_n x_n)^2 + (\beta_m y_m - \beta_n y_n)^2}, \quad (6)$$

式中: K_{mn} 为重新定义的耦合模系数^[8]; β_m 为入射纤芯 m 的固有传播常数; β_n 为耦合纤芯 n 的固有传播常数; $\Delta\beta_{mn}$ 为入射纤芯 m 与耦合纤芯 n 之间的固有传播常数之差,受纵向随机弯曲、扭转和结构波动的影响,纤芯之间的传播常数将会发生随机变化^[19]; d_c 为相关长度,文献[8]中对其进行了详细

的介绍; R_b 为 MCF 的弯曲半径; x_m, x_n 和 y_m, y_n 为对应纤芯在笛卡儿坐标系中的 x, y 坐标。

为了简化多输入弱耦合 MCF 的理论分析过程,考虑如图 1 所示的同质弱耦合三芯光纤,其中纤芯 1、2 为入射纤芯,纤芯 3 为耦合纤芯。图中箭头表示入射纤芯对耦合纤芯的耦合效应。

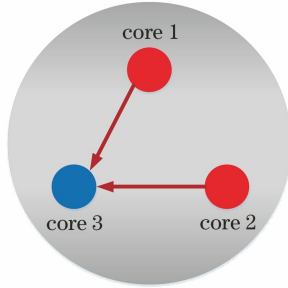


图 1 多输入弱耦合三芯光纤的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of multiple input weak coupling three-core fiber

基于(1)式所示的功率耦合方程,图 1 所示三芯光纤的具体功率耦合方程为

$$\frac{dP_1(z)}{dz} = \bar{h}_{12}[P_2(z) - P_1(z)] + \bar{h}_{13}[P_3(z) - P_1(z)], \quad (7)$$

$$\frac{dP_2(z)}{dz} = \bar{h}_{12}[P_1(z) - P_2(z)] + \bar{h}_{23}[P_3(z) - P_2(z)], \quad (8)$$

$$\frac{dP_3(z)}{dz} = \bar{h}_{13}[P_1(z) - P_3(z)] + \bar{h}_{23}[P_2(z) - P_3(z)]. \quad (9)$$

此外,由于纤芯结构的对称性,可以假设相邻纤芯之间的平均功率耦合系数相等,即 $\bar{h} = \bar{h}_{12} = \bar{h}_{13} = \bar{h}_{23}$ 。因此,通过求解上述功率耦合方程,并代入初值 $P_1(0) = 1, P_2(0) = 1, P_3(0) = 0$,可以得到各个纤芯中光信号功率沿 z 方向的解析解为

$$P_{n,12}(z) = \frac{2 + \exp(-3hz)}{3}, n = 1, 2, \quad (10)$$

$$P_{3,12}(z) = \frac{2 - 2\exp(-3hz)}{3}, \quad (11)$$

式中: $P_{n,12}(z)$ 为经过纤芯 1、2 耦合之后,耦合纤芯 n 中的光信号功率; $P_{3,12}(z)$ 为经过纤芯 1、2 耦合之后,纤芯 3 中的光信号功率。在多输入 MCF 中,某一纤芯的串扰是指除该纤芯之外所有纤芯的功率与该纤芯的功率之比^[7]。因此,还需求出当纤芯 3 为入射纤芯时,纤芯 3 沿 z 方向的解析解。与上述求解过程类似,仅以纤芯 3 为入射纤芯时,各纤芯沿 z 方向的解析解为

$$P_{n,3}(z) = \frac{1 - \exp(-3hz)}{3}, n = 1, 2, \quad (12)$$

$$P_{3,3}(z) = \frac{1 + 2\exp(-3hz)}{3}, \quad (13)$$

式中: $P_{n,3}(z)$ 为经过纤芯 3 耦合之后,纤芯 1、2 中的光信号功率; $P_{3,3}(z)$ 为经过纤芯 3 耦合之后纤芯 3 中的光信号功率。因此,纤芯 3 中的 ICXT 可表示为

$$C_{\text{XT}3,12} = \frac{P_{3,12}(z)}{P_{3,3}(z)} = \frac{2 - 2\exp(-3hz)}{1 + 2\exp(-3hz)}. \quad (14)$$

此外,对于多输入七芯光纤,本文也进行了理论推导。假设外部纤芯都为入射纤芯,中间纤芯为耦合纤芯,即 $P_1(0) = 0, P_n(0) = 1, n = 2, 3, \dots, 7$,其原理图如图 2 所示。则各个纤芯中光信号功率沿 z 方向的解析解为

$$P_{1,2-7}(z) = \frac{6 - 6\exp(-7hz)}{7}, \quad (15)$$

$$P_{n,2-7}(z) = \frac{6 + \exp(-7hz)}{7}, n = 2, 3, \dots, 7, \quad (16)$$

式中: $P_{1,2-7}(z)$ 为经过外部纤芯耦合之后,纤芯 1 中的光信号功率; $P_{n,2-7}(z)$ 为经过外部纤芯耦合之后,耦合纤芯 n 中的光信号功率。因此,中间纤芯 1 中的 ICXT 可表示为

$$C_{\text{XT}1,2-7} = \frac{P_{1,2-7}(z)}{P_{1,1}(z)} = \frac{6 - 6\exp(-7hz)}{1 + 6\exp(-7hz)}, \quad (17)$$

式中: $P_{1,1}(z)$ 为中间纤芯 1 为入射纤芯时纤芯 1 中光信号功率的解析解。

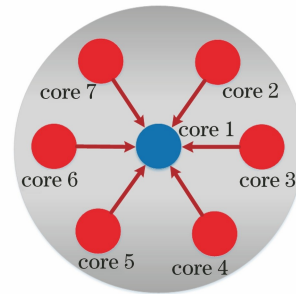


图 2 多输入弱耦合七芯光纤的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of 7-core fiber with multiple input weak coupling

3 仿真实验及结果分析

本节将基于上述理论推导,研究多芯干涉条件下 ICXT 的变化趋势。仿真过程中,假设 MCF 是完全同质的,即纤芯之间的固有传播之差为零,具体光纤参数如表 1 所示。为了降低模拟仿真的时间和

复杂度,本文使用的纤芯间距参数要远小于实际弱耦合 MCF 的纤芯间距,因此仿真的 ICXT 值要远大于实际弱耦合 MCF 的 ICXT 值。此外,仿真对比验证的过程中用到了通用半解析模型^[19]和功率耦合理论模型^[20]。

3.1 光信号功率

首先,对多芯干涉情况下芯间光信号功率的变化趋势进行了研究。仿真结果如图 3 所示。在多输入三芯光纤传输系统的仿真验证中,由于纤芯 1、2 的解析解相同,因此只给出了入射纤芯 1 的归一化功率变化趋势。同理,对于多输入七芯光纤传输系统,只给出了入射纤芯 2 的归一化功

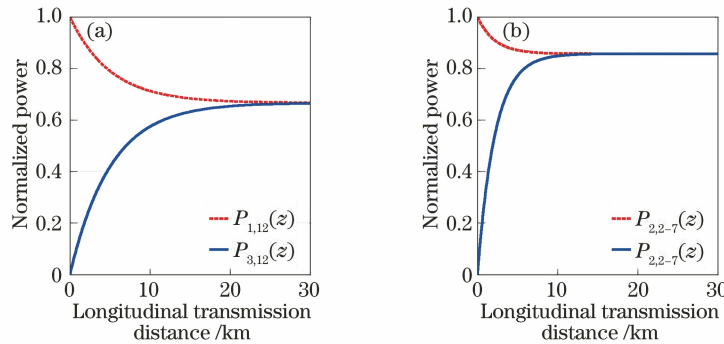


图 3 多芯干涉情况下入射纤芯和耦合纤芯的归一化功率与纵向传输距离的关系。(a)三芯光纤;(b)七芯光纤

Fig. 3 Normalized power as a function of longitudinal transmission distance of incident fiber core and coupled fiber core in case of multiple-core interference. (a) 3-core fiber; (b) 7-core fiber

从图 3 中可以看到,不论是三芯双输入光纤还是七芯六输入光纤,经过一段距离的传输之后,纤芯中光功率大小都将趋于一致,并且最终趋于一致的功率大小与入射纤芯和耦合纤芯的数量有关。对于三芯双输入单耦合 MCF,各纤芯中光功率 $P \approx 0.667$;对于七芯六输入单耦合 MCF,各纤芯中光功率 $P \approx 0.857$ 。在不考虑纤芯损耗的长距离 MCF 传输系统中,由于纤芯中波导之间的相互耦合效应,纤芯中光功率的大小将会动态地发生改变,直至各纤芯中功率完全相等,但各纤芯中功率相等并不代表波导之间不存在相互耦合效应,只是波导之间的相互耦合达到了一个动态平衡的状态,且这个动态平衡光功率可表示为

$$P_{\text{bal}} = \frac{P_{\text{in}}}{N_{\text{core}}}, \quad (18)$$

式中: P_{bal} 为动态平衡光功率的大小; P_{in} 为入射纤芯的光功率之和; N_{core} 为 MCF 的纤芯数量。

3.2 ICXT

在得到光信号功率的变化趋势之后,本文对上

率变化趋势。

表 1 同质均匀 MCF 的主要参数

Table 1 Main parameters of step-index homogeneous MCF

Parameter	Value
Core radius $a / \mu\text{m}$	4
Refractive index of cladding n_{cl}	1.4381
Refractive index of core	1.4453
Relative refractive index between core and cladding $\Delta_1 / \%$	0.5
Distance between adjacent cores $D / \mu\text{m}$	30
Bending radius R_{b} / mm	200
Twisting rate $\gamma / (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	2π
Wavelength λ / nm	1550
Correlation length d_{c} / m	0.01

述推导的三芯光纤多芯干涉情况下耦合纤芯中 ICXT 的关系式[(14)式]进行了模拟仿真分析。仿真结果如图 4 所示。

图 4 中 $C_{\text{XT}3,12}$ 为由(14)式得到的仿真结果; $C_{\text{CPT},31}$ (下标 CPT 代表基于功率耦合理论模型得到的仿真结果)为单独考虑纤芯 1 对纤芯 3 的耦合,基于功率耦合理论模型得到的仿真结果; $C_{\text{USAM},31}$ (下标 USAM 代表基于通用半解析模型得到的仿真结果)为单独考虑纤芯 1 对纤芯 3 的耦合,基于通用半解析模型得到的仿真结果; $C_{\text{CPT},31+32}$ 和 $C_{\text{USAM},31+32}$ 分别为单独考虑纤芯 1 对纤芯 3 的耦合,加上单独考虑纤芯 2 对纤芯 3 的耦合,基于功率耦合理论模型和通用半解析模型得到的仿真结果,即 $C_{\text{CPT},31+32} = C_{\text{CPT},31} + C_{\text{CPT},32}$, $C_{\text{USAM},31+32} = C_{\text{USAM},31} + C_{\text{USAM},32}$ 。另外在仿真的过程中发现 $C_{\text{CPT},31} \approx C_{\text{CPT},32}$, $C_{\text{USAM},31} \approx C_{\text{USAM},32}$, 因此图 4 中只给出了 $C_{\text{CPT},31}$ 和 $C_{\text{USAM},31}$ 的仿真结果。从图 4 的仿真结果可以看到,将多芯干涉的复杂情形简化为双芯光纤的单输入情形,再将单输入情况下的 ICXT 进行累

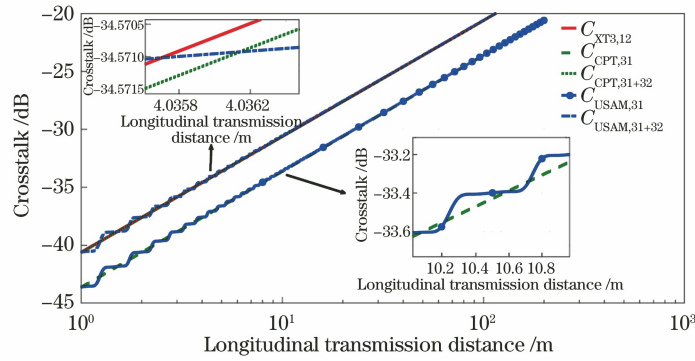


图 4 三芯光纤多芯干涉情况下 ICXT 与纵向传输距离的关系

Fig. 4 ICXT as a function of longitudinal transmission distance for 3-core fiber with multiple core interference

加,分别利用功率耦合理论模型和通用半解析模型得到的仿真结果与精确理论解匹配良好。

此外,对于七芯光纤多芯干涉情况下耦合纤芯中 ICXT 分布的仿真结果如图 5 所示。图中 $C_{XT1,2-7}$ 为由(17)式得到的仿真结果; $C_{CPT,12}$ 为单独考虑纤芯 2 对纤芯 1 的耦合,基于功率耦合理论模型得到的仿真结果; $C_{USAM,12}$ 为单独考虑纤芯 2 对纤芯 1 的耦合,基于通用半解析模型得到的仿真结果; $C_{CPT-SUM}$ 和 $C_{USAM-SUM}$ 为单独考虑所有外部纤芯对中间纤芯 1 的耦合,将所有结果累加得到的仿真结果,即 $C_{CPT-SUM} = C_{CPT,12} + C_{CPT,13} + C_{CPT,14} + C_{CPT,15} + C_{CPT,16} + C_{CPT,17}$, $C_{USAM-SUM} = C_{USAM,12} + C_{USAM,13} + C_{USAM,14} + C_{USAM,15} + C_{USAM,16} + C_{USAM,17}$ 。另外,从仿真结果可以看出外部纤芯对中间纤芯的

串扰几乎相等,因此图 5 中只给出了 $C_{CPT,12}$ 和 $C_{USAM,12}$ 的仿真结果。将多芯干涉简化为双芯光纤的单输入情形,再将单输入条件下得到的 ICXT 进行累加,得到的仿真结果与精确理论解匹配良好。因此,根据图 4 和图 5 的仿真结果和文献[22]中的实验结果,可以得出以下结论:在研究多芯干涉光纤传输系统的 ICXT 特性时,不同入射纤芯对耦合纤芯串扰的贡献是不相关的,可以将 MCF 传输系统简化为多个较为简单的双芯单输入光纤传输系统,并且耦合纤芯中的 ICXT 分布可以看成是多个双芯单输入 ICXT 分布的累加。例如,可以将七芯六输入多芯干涉光纤传输系统转化为如图 6 所示的多个双芯单输入光纤传输系统进行简化分析。

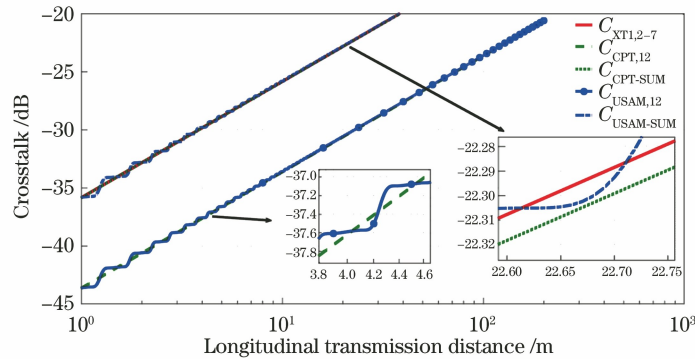


图 5 七芯光纤多芯干涉情况下 ICXT 与纵向传输距离的关系

Fig. 5 ICXT as a function of longitudinal transmission distance for 7-core fiber with multiple core interference

对于多输入多芯干涉 MCF 传输系统,可以将通用半解析模型^[19]推广为

$$C_{XTmul} = \sum_{m \neq n} \sum_{i=1}^N \Delta C_{XTmn,i} = \sum_{m \neq n} \sum_{i=1}^N \left[\frac{k_{mn,i}(d)}{g_{mn,i}} \sin(g_{mn,i}d) \right]^2, \quad (19)$$

式中: C_{XTmul} 为多芯干涉情况下耦合纤芯中的 ICXT; N 为分段数量; $k_{mn,i}$ 为入射纤芯 m 与耦合

纤芯 n 之间第 i 段的耦合模系数; $g_{mn,i}$ 为入射纤芯 m 与耦合纤芯 n 之间第 i 段经修正后的耦合模系数; $\Delta C_{XTmn,i}$ 为入射纤芯 m 和耦合纤芯 n 第 i 段增加的 ICXT; d 为分段长度。同理,功率耦合理论模型^[20]可以推广为

$$C_{XTmul} = \sum_{m \neq n} \tanh(\bar{h}_{mn}L) \approx \sum_{m \neq n} \bar{h}_{mn}L, \quad (20)$$

式中: L 为光在光纤中的纵向传输距离。对于理想

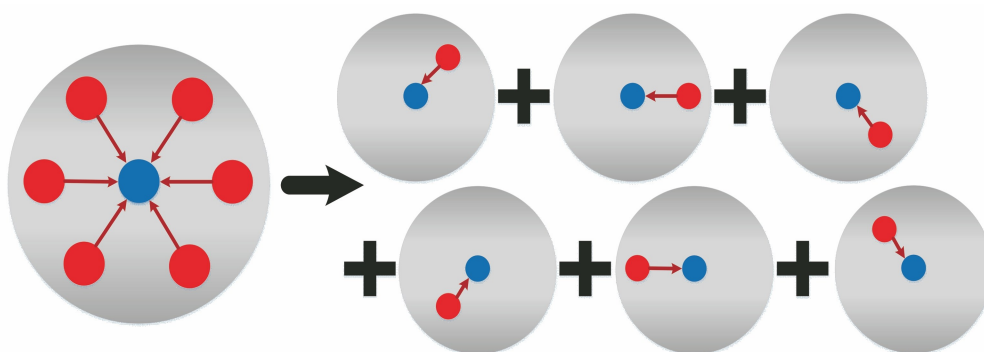


图 6 将多芯干涉光纤简化为单输入光纤的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of multiple interference fiber simplified to single input fiber

完全同质 MCF, 离散变化模型^[7]可以推广为

$$C_{\text{XTmul}} = \sum_{m \neq n} 2 \frac{k_{mn}^2}{\beta} \cdot \frac{R_b}{D_{mn}} L, \quad (21)$$

式中: k_{mn} 为入射纤芯 m 与耦合纤芯 n 之间的耦合模系数; β 为入射纤芯 m 和耦合纤芯 n 的固有传播常数, $\beta = \beta_m = \beta_n$; D_{mn} 为入射纤芯 m 与耦合纤芯 n 的芯间距离。

4 结 论

基于功率耦合理论, 研究了多芯干涉情况下光信号功率的变化趋势和 ICXT 的分布特性, 推导了多种情况下 ICXT 的解析表达式, 通过对比仿真发现了不同条件下光信号功率的变化趋势和 ICXT 的分布特性。仿真结果表明, 经过长距离的传输之后, 各纤芯中的光功率都将达到一个动态平衡的状态, 提出了动态平衡归一化功率的计算公式。此外, 在多芯干涉情况下, 不同入射纤芯对耦合纤芯串扰的贡献是不相关的, 耦合纤芯中 ICXT 的分布可以看成是多个双芯单输入 ICXT 分布的累加。通过分析得到了多个应用于多芯干涉 MCF 传输系统的串扰评估数学模型, 完善了多芯干涉情况下 ICXT 的分析理论以为该情形提供良好的理论分析工具。

参 考 文 献

- [1] Yuan H, Furdek M, Muhammad A, et al. Space-division multiplexing in data center networks: on multi-core fiber solutions and crosstalk-suppressed resource allocation[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(4): 272-288.
- [2] Saitoh K, Matsuo S. Multicore fiber technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 55-66.
- [3] Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003.
- [4] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106003.
- [5] Puttnam B J, Luís R S, Agrell E, et al. High capacity transmission systems using homogeneous multi-core fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(6): 1157-1167.
- [6] Sakaguchi J, Puttnam B J, Klaus W, et al. 305 Tb/s space division multiplexed transmission using homogeneous 19-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 554-562.
- [7] Liu C, Pei L, Xie Y H, et al. Design of low crosstalk few mode multi-core fiber based on heterogeneous structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1106004.
- [8] 刘畅, 裴丽, 解宇恒, 等. 异质结构的低串扰少模多芯光纤设计[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1106004.
- [9] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, et al. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16576-16592.
- [10] Koshiha M, Saitoh K, Takenaga K, et al. Multi-core fiber design and analysis: coupled mode theory and coupled-power theory[J]. Optics Express, 2011, 19(26): 102-111.
- [11] Qian J R. Coupled-mode theory and its application to fiber optics[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1188-1192.
- [12] 钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1188-1192.
- [13] Mumtaz S, Essiambre R J, Agrawal G P. Nonlinear propagation in multimode and multicore fibers: generalization of the manakov equations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(3): 398-406.
- [14] Macho A, Morant M, Llorente R. Experimental evaluation of nonlinear crosstalk in multi-core fiber [J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18712-18720.

- [12] Macho A, Morant M, Llorente R. Unified model of linear and nonlinear crosstalk in multi-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(13): 3035-3046.
- [13] Soeiro R O J, Alves T M F, Cartaxo A V T. Impact of longitudinal variation of the coupling coefficient due to bending and twisting on inter-core crosstalk in weakly-coupled MCFs [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 3898-3911.
- [14] Soeiro R O J, Alves T M F, Cartaxo A V T. Inter-core crosstalk in weakly coupled MCFs with arbitrary core layout and the effect of bending and twisting on the coupling coefficient [J]. *Optics Express*, 2019, 27(1): 74-91.
- [15] Soeiro R O J, Alves T M F, Cartaxo A V T. Dual polarization discrete changes model of inter-core crosstalk in multi-core fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(16): 1395-1398.
- [16] Gan L, Shen L, Tang M, et al. Investigation of channel model for weakly coupled multicore fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5182-5199.
- [17] Alves T M F, Cartaxo A V T. Characterization of the stochastic time evolution of short-term average intercore crosstalk in multicore fibers with multiple interfering cores[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4605-4620.
- [18] Yang F, Tang M, Li B R, et al. Design and optimization of multi-core fibers with low crosstalk and large effective area [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106005.
杨芳, 唐明, 李博睿, 等. 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化 [J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106005.
- [19] Wang W J, Xiang L, Shao W D, et al. Stochastic crosstalk analyses for real weakly coupled multicore fibers using a universal semi-analytical model [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(13): 4503-4510.
- [20] Koshiya M, Saitoh K, Takenaga K, et al. Analytical expression of average power-coupling coefficients for estimating intercore crosstalk in multicore fibers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1987-1995.
- [21] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, et al. Low-loss and large-aeff multi-core fiber for SNR enhancement [C]//European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 16-20, 2012, Amsterdam, Netherlands. Washington, D. C.: OSA, 2012: 1-3.
- [22] Alves T M F, Soeiro R O J, Cartaxo A V T. Probability distribution of intercore crosstalk in weakly coupled MCFs with multiple interferers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(8): 651-654.