

体全息存储记录通道噪声模型的研究与设计^{*})

吴非¹ 刘朝斌² 谢长生¹ 陈端容¹

(华中科技大学计算机学院外存储国家重点实验室 武汉 430074)¹

(大连海事大学计算机科学与技术学院 大连 116026)²

摘要 体全息存储系统具有存储容量大、数据传输率快、存储时间短以及能快速进行图像或图形匹配和内容相关寻址操作的潜力,极有可能成为下一代大容量数据存储方法。但是体全息存储记录通道中复杂的噪声来源一直是妨碍体全息存储技术实用化的主要问题之一。本文将分析体全息存储通道中存在的各种噪声来源,并提出记录通道噪声的物理模型,为设计噪声的抑制方法奠定理论基础。

关键词 体全息存储,串扰噪声,噪声分布,噪声模型

Design and Study on the Noise Model of Recoding Channel in Volume Holographic Storage

WU Fei¹ LIU Zhao-Bin² XIE Chang-Sheng¹ CHEN Duan-Rong¹

(National Storage System Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)¹

(Dept. of Computer Sci. & Tech., Dalian Maritime University, Dalian 116026)²

Abstract Volume holographic storage has the vast potential to offer high density, high-speed transfer rate, fast data readout rate, and associative content addressable storage. However it is always one of main problems for volume holographic storage which is made practicality that there are a lot of the complex noise sources in the recording channel. In the paper, we analyze the noise source of recording channel in volume holographic storage, and produce the noise model. It is the theoretical basis on designing the restraining method of noise.

Keywords Volume holographic storage, Cross-talk noise, Noise distribution, Noise model

1 引言

传统的存储技术主要是基于二维面存储技术,如磁盘存储和光盘存储,一个信息位是由介质表面物理性质或化学性质的改变(如消融的凹点或磁畴的翻转等)来表示的。而在体全息存储中,数据是按照“页”面的方式进行信息的存储,一位的信息分布在记录体中,在记录介质上没有同信息位一一对应的微小元素。它与传统存储技术中按“位”操作的串行方式显著不同,是以页为单位存储和利用内在的并行性恢复数据,近几年随着光器件和材料技术的发展,其读出速率可高达 1GB/s,存储容量可高达 200Gbit/in²。由于体全息存储技术具有存储容量大、数据传输率高、存取时间短,以及可快速进行图像匹配和内容相关寻址操作等特点,成为最有吸引力的技术之一^[1~4]。但是体全息存储通道中复杂的噪声来源一直是妨碍体全息存储技术实用化的主要问题之一。随着材料和光器件技术的发展,全息存储正在向实用化方向迈进,对其存储数据的正确性的要求也越来越高,因此对噪声和存储通道的分析也日益受到各国研究者的重视。

2 体全息存储噪声信号分析

体全息存储通信信道是一个非线性信道,体全息存储是从数据的写入到数据的读出的记录过程,存储通道中存在的噪声源,主要包括光系统噪声、记录介质噪声、全息存储复用噪声,电子线路噪声^[5,6]等。

2.1 体全息存储光学系统引入噪声

在体全息数据存储系统中,数据的存储是利用相干光源的相干光产生干涉条纹进行记录的。在光学系统中,由于要求光源在空间和时间上高度相干,而引起了光学表面多重反射噪声;由于光学器件表面的缺陷和杂质引起了激光的散斑噪声(speckle noise)。为了解决由于光学表面多重反射噪声造成的影响,通常将系统中光学器件表面镀上负反射膜,以降低反射光能量,以便减小由于多重反射而形成的干涉条纹的调制宽度。为了解决激光散斑噪声造成的影响,我们可以尽可能地减少光束的时间或空间的相关性,来减少该种噪声的干扰^[7,8]。我们对这类噪声称之为光学系统的固有噪声。

2.2 体全息存储介质引入噪声

体全息数据存储系统是采用光折变晶体作为存储材料。由于光折变晶体内部的耦合性较强,形成较强的扇形散射光。数据在存储的过程中,扇形散射光同时被记录下来;在数据读出的过程中,部分扇形散射光和再现光会叠加在一起,同时表现在再现现象中,我们称之为扇形噪声(scatter noise)。这类噪声对图像的多重存储和衍射效率的影响较大,因为它消耗了部分记录光的能量,降低了记录强度。为了降低这种噪声的影响,我们可以采用弱光写入、强光读出或在记录介质中加入镁、铁等杂质,来改变光折变晶体的部分性能的方法^[9,10]。

2.3 体全息存储复用技术引入噪声

一般而言,体全息数据存储系统多采用角度、空间、波长等复用技术,使得在同一体积内记录多重全息图,引起了大量

^{*})国家“973”重大基础研究项目,课题编号 G1999033006。吴非 讲师、在职博士生,主要研究方向:计算机系统结构、全息存储方法、数字信号处理技术。

的串扰。其串扰噪声主要包含页内像素串扰、页间像素串扰、由 SLM 和 CCD 不对准引起的串扰等。

页内像素串扰噪声：同一数据页的内部不同像素或码元之间的相互干扰而产生的噪声。它是由全息存储原理所引起的。因为任何一个实际成像系统都具有有限孔径，空间带宽是有限的。由于带宽不足就可能造成高频信号丢失或抑制，点扩展函数展宽就造成相邻像素点的重叠。当携带数据信息

的图像通过系统时，图像的高频信息会被截止，以致于图像模糊不清，严重时会发生图像失真。

页间像素串扰：是复用于同一记录介质体积内的其它全息图对再现光的不必要的衍射而产生的串扰噪声。分为两种：(1)因采用角度复用，记录在同一位置而导致的像素间的串扰；(2)因采用空间复用，记录在不同位置的像素间的串扰。如图 1 所示。

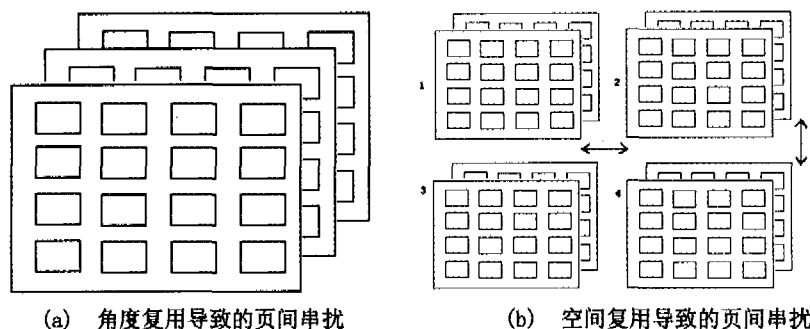


图 1 页间像素串扰意识图

在角度复用时，符合参考光束 Bragg 判据的数据页，衍射效率最高，其它数据页的衍射效率随 Bragg 失配量按 sinc 函数变化。当我们再现一幅全息图时，由于所有数据页同时发生衍射，尽管其它的全息图不满足 Bragg 条件，但其 Bragg 失配并不是很大，其串扰是所有其它数据页影响的总和，以致于对再现光产生相当强度的衍射，从而影响再现全息图的质量。随着角度复用间隔的增加，页间串扰逐渐减小^[11~13]。

SLM 和 CCD 不对准串扰：由于 SLM 相对于 CCD 有一定的水平偏移，使得再现现象图像存在着放大误差。每个 CCD 像素的场分布不仅依赖于和它相对应的 SLM 像素的值，而且也周围邻近的 CCD 像素的值有关，会引来码间干扰。

2.4 体全息存储电子线路引入噪声

电子线路噪声主要是 CCD 探测器和 A/D 转换等周围辅

助电路等电子设备引起的噪声，包括电荷载流子的随机运动产生的热噪声 (thermal noise)、半导体器件中电流随机起伏引起的散弹噪声 (shot noise)、低频噪声、CCD 噪声、A/D 转换的量化噪声等。热噪声与器件的温度有关，可以通过降低器件的温度来减小其影响；散弹噪声与半导体的直流电流有关；低频噪声与电子器件的材料有关，其功率谱密度随频率的增加而降低；CCD 噪声受器件的影响，可通过对 CCD 制冷的方法抑制这种噪声；A/D 转换的量化噪声是由于采用有限字长表示的量化值代替模拟值而产生的，随着量化位数的增加而迅速降低，我们可以采用高精度的 A/D 转换器。

3 体全息存储系统记录通道噪声简化模型的建立和分析

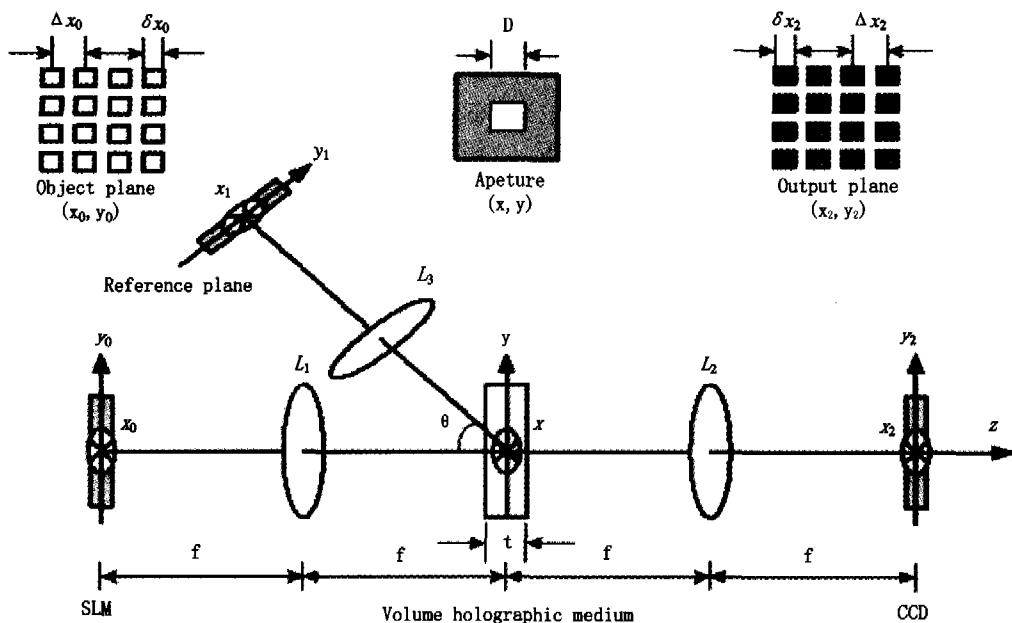


图 2 体全息存储数据页示意图

体全息数据存储系统是复杂的，数据的恢复过程和光强度是有一定联系的。在不同的存储介质、复用技术、系统配置等方案下会产生不同强度的噪声，各种噪声的影响也不尽相

同，最终对系统起决定性作用的噪声源也会有所不同^[14]，故我们不能仅仅考虑对单个噪声源的分析，而要综合考虑所有噪声的叠加影响。因此，我们必须从噪声影响的综合角度出

发,建立记录通道的噪声简化模型^[15~18]。

在体全息存储系统中,假定 SLM 的像素工作长度为 δx_0 , 每个像素之间的间距是 Δx_0 , 其线性填充因子为 $\alpha = \delta x_0 / \Delta x_0$; 同样假定 CCD 的像素工作长度为 δx_2 , 每个像素之间的间距是 Δx_2 , 其线性填充因子为 $\beta = \delta x_2 / \Delta x_2$, 并默认 $\Delta x_0 = \Delta y_0, \delta x_0 = \delta y_0, \Delta x_2 = \Delta y_2, \delta x_2 = \delta y_2$, 如图 2 所示。

假定我们把在 SLM 上第 p 行和第 q 列对应的像素的值表示为 $a(p, q)$, 相应的对应 CCD 上的像素的值定义为 $r(p, q)$; $f(p, q)$ 为位于光轴上 SLM 平面的任意图像的理想幅值输出分布; PSF(p, q) 为系统的二维点扩散函数 (point spread function)。由 CCD 的探测特性可知, 它测量的是能量的大小, 即入射到 CCD 像素表面的光强在像元上的积分, 则 $r(p, q)$ 可表示为:

$$r(p, q) = \int_{(p-\beta/2)\Delta x_2}^{(p+\beta/2)\Delta x_2} \int_{(q-\beta/2)\Delta y_2}^{(q+\beta/2)\Delta y_2} |f(x, y) \otimes \text{PSF}(x, y) + n_0(x, y)|^2 dx dy + n_e(p, q) \quad (1)$$

其中, \otimes 表示卷积, $n_0(x, y)$ 像素 $a(p, q)$ 经过 SLM 映射到光通道产生的光噪声的幅值分布函数, $n_e(p, q)$ 是 CCD 上的像素 $r(p, q)$ 上产生的电噪声的幅值分布函数。我们可将其记录通道简化模型抽象为图 3。

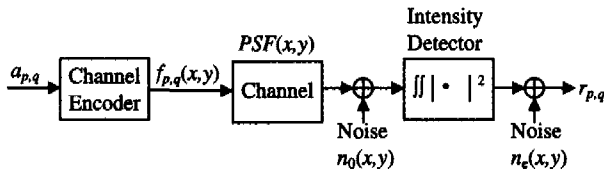


图 3 记录通道简化噪声模型

分析图 2 可知, 任意图像的输出分布可表示为:

$$f(x, y) = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N a(p, q) \text{rect}\left(\frac{x - \alpha \Delta x_0}{\delta x_0}, \frac{y - \alpha \Delta y_0}{\delta y_0}\right) = \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N a(p, q) \text{rect}\left(\frac{x - \alpha \Delta x_0}{\delta x_0}, \frac{y - \alpha \Delta y_0}{\delta y_0}\right) \quad (2)$$

其中, SLM 上记录的是“亮”或“暗”像素, 则 $a(p, q)$ 大小为 0 或 1。矩形函数的定义,

$$\text{rect}\left(\frac{x - x_0}{a}\right) = \begin{cases} 1, & |x - x_0| \leq \frac{a}{2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式表示函数以 x_0 为中心、宽度为 a ($a > 0$)、高度为 1 的矩形; 而 $\text{rect}(x, y)$ 则表示中心在原点、高度为 1、边长为 1 的正方体, 故

$$\text{rect}\left(\frac{x - \alpha \Delta x_0}{\delta x_0}, \frac{y - \alpha \Delta y_0}{\delta y_0}\right) = \begin{cases} 1, & |x - \alpha \Delta x_0| \leq 1/2 \delta x_0, |y - \alpha \Delta y_0| \leq 1/2 \delta y_0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

假定孔径光阑在两个方向上的尺寸均为 D , 根据傅里叶光学理论, 系统的振幅点扩展函数 PSF(p, q) 为

$$\text{PSF}(x, y) = \left(\frac{D}{\lambda f}\right)^2 \text{sinc}\left(\frac{Dx}{\lambda f}, \frac{Dy}{\lambda f}\right) = \left(\frac{D}{\lambda f}\right)^2 \text{sinc}\left(\frac{Dx}{\lambda f}\right) \text{sinc}\left(\frac{Dy}{\lambda f}\right) \quad (5)$$

式中, λ 为激光的波长, f 为透镜的焦距, sinc 函数的定义为

$$\text{sinc}\left(\frac{x}{a}\right) = \frac{\sin \pi(x)/a}{\pi(x)/a} = \begin{cases} 1, & x=0 \\ 0, & x = \pm na (n=1, 2, \dots, a > 0) \\ \text{正的或负的小数}, & x \neq \pm na (n=0, 1, 2, \dots, a > 0) \end{cases} \quad (6)$$

孔径 D 由全息图的衍射孔径决定, 它的大小是光记录通道的传输函数的一个重要参数, 决定了页内符号间的串扰 ISI 的影响程度。

不失一般性, 我们定义 CCD 表面的复振幅分布为

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes \text{PSF}(x, y) \quad (7)$$

将(2)、(3)、(4)、(5)式代入(7)式, 得

$$\begin{aligned} g(x, y) &= f(x, y) \otimes \text{PSF}(x, y) \\ &= \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N a(p, q) \text{rect}\left(\frac{x - \alpha \Delta x_0}{\delta x_0}\right) \text{rect}\left(\frac{y - \alpha \Delta y_0}{\delta y_0}\right) \otimes \left(\frac{D}{\lambda f}\right)^2 \text{sinc}\left(\frac{Dx}{\lambda f}\right) \text{sinc}\left(\frac{Dy}{\lambda f}\right) \\ &= \left(\frac{D}{\lambda f}\right)^2 \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N a(p, q) \text{rect}\left(\frac{x - \alpha \Delta x_0}{\delta x_0}\right) \text{rect}\left(\frac{y - \alpha \Delta y_0}{\delta y_0}\right) \\ &\quad \otimes \text{sinc}\left(\frac{Dx}{\lambda f}\right) \text{sinc}\left(\frac{Dy}{\lambda f}\right) \\ &= \left(\frac{D}{\lambda f}\right)^2 \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N a(p, q) \left(\text{rect}\left(\frac{x - \alpha \Delta x_0}{\delta x_0}\right) \otimes \text{sinc}\left(\frac{Dx}{\lambda f}\right)\right) \\ &\quad \left(\text{rect}\left(\frac{y - \alpha \Delta y_0}{\delta y_0}\right) \otimes \text{sinc}\left(\frac{Dy}{\lambda f}\right)\right) \\ &= \left(\frac{D}{\lambda f}\right)^2 \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N a(p, q) \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{\tau - \alpha \Delta x_0}{\delta x_0}\right) \times \text{sinc} \\ &\quad \left(\frac{D(x - \tau)}{\lambda f}\right) d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{\varphi - \alpha \Delta y_0}{\delta y_0}\right) \times \text{sinc} \\ &\quad \left(\frac{D(y - \varphi)}{\lambda f}\right) d\varphi \\ &= \left(\frac{D}{\lambda f}\right)^2 \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N a(p, q) \int_{\alpha \Delta x_0 - (1/2)\delta x_0}^{(1/2)\delta x_0 + \alpha \Delta x_0} \text{sinc}\left(\frac{D(x - \tau)}{\lambda f}\right) d\tau \\ &\quad \int_{\alpha \Delta y_0 - (1/2)\delta y_0}^{(1/2)\delta y_0 + \alpha \Delta y_0} \text{sinc}\left(\frac{D(y - \varphi)}{\lambda f}\right) d\varphi \end{aligned}$$

将上式代入到(1)式, 得

$$\begin{aligned} r(p, q) &= \int_{(p-\beta/2)\Delta x_2}^{(p+\beta/2)\Delta x_2} \int_{(q-\beta/2)\Delta y_2}^{(q+\beta/2)\Delta y_2} \left(\frac{D}{\lambda f}\right)^2 \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N a(p, q) \int_{\alpha \Delta x_0 - (1/2)\delta x_0}^{(1/2)\delta x_0 + \alpha \Delta x_0} \text{sinc} \\ &\quad \left(\frac{D(x - \tau)}{\lambda f}\right) d\tau \int_{\alpha \Delta y_0 - (1/2)\delta y_0}^{(1/2)\delta y_0 + \alpha \Delta y_0} \text{sinc}\left(\frac{D(y - \varphi)}{\lambda f}\right) d\varphi + n_0 \\ &\quad (x, y)|^2 dx dy + n_e(p, q) \end{aligned}$$

根据我们建立的存储记录通道噪声模型, 我们得出了体全息数据存储记录通道噪声模型输入和输出之间的数据关系。在该模型中, 我们主要考虑页内串扰、光噪声和电噪声。从该模型中我们知道, CCD 上的 $r(p, q)$ 像素的输出值不仅和 SLM 上的 $a(p, q)$ 有关, 而且和 SLM 上的周围像素有关。由图 4 可知, 一个电光源的 90% 能量集中在一个 5×5 的单位面积的区域^[19]。在这样的一个大小内, 页内像素干扰较强, 区域范围外的页内像素的干扰就非常小了。

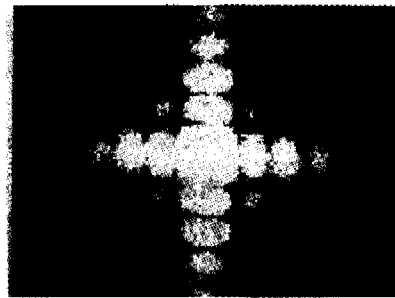


图 4 方形光阑远场衍射图案

结论 通过对体全息存储系统噪声源的分析, 我们建立 (下转第 35 页)

第四,提高生成组播树的代价性能和降低算法计算复杂度的折中也是高性能组播路由算法需要研究的核心问题之一。算法的代价性能和计算复杂度通常是一对矛盾的指标。要降低算法复杂度必然影响算法性能的提高,而要有好的代价性能则算法复杂度就会增加。一个好的组播算法总是要在组播树的总体代价与计算复杂度之间做出权衡,这仍然是 Internet 高性能组播路由算法要研究的一个问题。

最后,适应下一代 Internet 高性能网络的各种特定 QoS 要求的组播算法也是研究的一个方面。下一代 Internet 组播业务众多,不同的业务有不同的需要,而且服务质量要求更加严格,满足各种特定要求的 QoS 约束组播路由算法仍是研究的一个重要方面。

小结 通过对 Internet 组播路由问题的描述和国内外组播路由算法研究现状的分析,可以得出高性能组播路由算法是网络通信研究的一个难点和热点问题。组播路由的目标是寻找一覆盖源节点和所有目的节点的组播树,而这棵组播树必须由一个高效的组播路由算法来生成实现,因此组播路由算法就是要在通信网中建立一棵以信息源为根简单、有效、健壮的信息转发树。目前 QoS 约束的静态组播路由算法已经有了比较深入的研究,下一阶段着重研究 Internet 高性能组播路由算法,主要表现为动态、分布式、分层/聚合、高代价性能、低复杂度、多 QoS 约束的组播路由算法。以后将以以上讨论为背景,对 Internet 高性能组播路由算法展开研究。

参考文献

- Holbrook H, Cain B. Source-Specific Multicast for IP. draft-ietf-ssm-arch-06. Mar 07, 2005
- Laxman H, Sahasrabudhe, Biswanath Mukherjee. Multicast Routing Algorithms and Protocols; A Tutorial, IEEE Network, 2000(1):92~102
- Wang Bin, Hou J C. Multicast Routing and its Extension; Problems, Algorithms, Protocols [J], IEEE Network, January 2000 (1):22~36
- 徐格, 吴建平, 徐明伟. 高等计算机网络. 北京:机械工业出版社, 2003

(上接第 15 页)

了体全息存储记录通道噪声模型。依据此模型,可以设计适当的信源编码和信道编码技术来抑制存储系统中噪声的影响,为体全息存储技术实用化奠定基础。

参考文献

- Burr G W. Holographic storage. Encyclopedia of Optical Engineering. In: Johnson R B, Driggers R G, ed. New York: Marcel Dekker, 2003. 1~15
- Hong J F, McMichael I, Chang T Y, et al. volume holographic memory systems; techniques and architectures. Opt Eng, 1995, 34(8):2193~2203
- Coufal H J, Psaltis D, Sincero G T. Holographic data storage. In: Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000. 3~87, 283~479
- Psaltis D, Burr G W. Holographic data storage. IEEE Computer, 1998, 31(2): 52~60
- 陶世荃主编. 全息存储. 北京:北京工业大学出版社, 1998
- Wu Fei, Xie Chengsheng, Liu Zhaobin. Signal for the volume holographic storage system. Computer and Communication, 2005, 4
- Gerritsen H J, Hannan W J, Ramberg E G. Elimination of speckle noise in holograms with redundancy. Appl Opt 1968, 7(11): 2301~2311
- Amako J, Miura H, Sonehara T. Speckle noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator. Appl Opt, 1995, 34(17): 3165~3171
- Rajenbach H, Pelboulbe A, Huignard J P. Noise suppression in

- Dijkstra E. A Note on Two Problems in Connection with Graphs [J]. Numerical Mathematic, 1959(1): 269~271
- Andrew S. Tanenbaum. Computer Networks (Third Edition). Prentice Hall International, Inc. 1996
- Zhang Baoxian, Mouftah H T. A Destination-Driven Shortest Path Tree Algorithm. In: Proc. of the 2002 IEEE Int'l Conf. on communication, 2002(4): 2258~2261
- Fujinoke H, Christensen K J. The New Shortest Best Path Tree (SBPT) Algorithm for Dynamic Multicast Trees. In: Proc. of the 24th IEEE Int'l Conf. on Local Computer Networks, 1999. 204~210
- Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L. Introduction to Algorithms. MIT Press, 1997
- Kou L, Markowsky G, Berman L. A fast algorithm for Steiner trees in graphs. Acta Informatica, 1981, 15(2): 141~145
- Winter P. Steiner problem in networks; survey [J]. Networks, 1987, 3: 129~167
- Rayward-Smith V J. The computation of nearly minimal steiner trees in graphs [J]. Int J Math Educ Sci Technol, 1983, 14: 15~23
- Zhu Q, Parsa M, Garcia-Luna-Aceves J J. A source-based algorithm for delay-constrained minimum-cost multicasting. In: Proc. IEEE INFOCOM'95, 1995. 377~385
- Kompella V P, Pasquale J C, Polyzos G C. Multicasting for multimedia applications. In: Proc. IEEE INFOCOM'92, 1992. 2078~2085
- Sun Q, Langendoerfer H. Efficient multicast routing for delay-sensitive applications. In: Proc. Second Workshop Protocols Multimedia Systems (PROMS'95), Oct. 1995. 452~458
- Jia Xiaohua. A Distributed Algorithm of Delay-Bounded Multicast Routing for Multimedia Applications in Wide Area Networks. IEEE Transaction on Networking, 1998, 6(6): 828~837
- Rouskas R N, Baldine I. Multicast routing with end-to-end delay and delay variation constraints. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(3): 346~356
- 王琦, 孙亚民. 一种基于拉格朗日松弛的时延约束组播路由算法 [J]. 通信学报, 2004, 25(5): 92~102
- 孔令山, 丁炜. 一种多约束 QoS 多播路由算法. 通信学报, 2003, 24(7): 30~36
- Raghavan S, Manimaran G, et al. A Rearranging algorithm for the construction of delay-constrained dynamic multicast trees. IEEE Transaction on Networking, 1999, 7(4): 514~529
- Salama H F. Evaluation of Multicast Routing Algorithm for Real-Time Communication on High-Speed Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1997, 15(3): 332~345

photorefractive image amplifier. Opt Lett, 1989, 14(22): 1275~1277

- Rabinovich W S, Feldman B J, Gilbreach G C. Suppression of photorefractive beam fanning using achromatic gratings. Opt Lett, 1991, 16(15): 1147~1149
- Asthana P, Nordin G P, Tanguay A R, et al. Analysis of weighted fan-out/fan-in volume holographic optical interconnection. Appl Opt Lett, 1993, 32(8): 1441~1469
- Gu C, McMichael I, Saxena R, et al. Cross-talk-limited storage capacity of volume holographic memory. Opt Soc Am A, 1992, 9(11): 1978~1983
- Curtis K, Gu C, Psaltis D. Cross talk in wavelength-multiplexed holographic memories. Appl Opt Lett, 1993, 18(12): 1001~1003
- Keskinoz M, Kumar B V K V. Application of linear minimum mean-squared-error equalization for volume holographic data storage. Appl Opt, 1999, 38(20): 4387~4393
- Vadde V, Kumar B V K V. Channel Estimation and Intra-page Equalization for Digital Volume Holographic Data Storage. SPIE, 3109: 245~250
- Vadde V, Kumar B V K V. Efficient Modeling of Volume Holographic Storage Channels (VHSC). IEEE, 2000. 116~118
- Vadde V, Kumar B V K V. Efficient Modeling and Iterative Magnitude-Squared Decision Feedback Equalization (DFE) for volume holographic storage channels. IEEE, 2001. 2696~270
- 陈端容. 全息存储通道中 6:8 等调制码的优化研究 [D]. 见: 武汉: 华中科技大学. 2003, 11: 22~24
- 刘思敏, 许京军, 郭儒. 相干光学原理及应用. 见: 天津: 南开大学出版社, 2001. 52~61