

基于逻辑运算的光域网络编码节点模型

曲志坚¹, 柏琳², 刘晓红¹

(1. 山东理工大学计算机科学与技术学院, 山东淄博 255049; 2. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘 要: 光网络缺少随机存储设备, 难以独立于光电光变换实现线性网络编码技术. 为了将网络编码技术引入到光网络中, 提出一种能够在光域中实现的基于逻辑移位和逻辑异或运算的双路径网络编码机制. 该网络编码机制比异或网络编码的通用性更强, 并且能够在光域中独立于光电光变换实现, 降低了实现代价. 此外, 针对提出的网络编码机制在实现过程中遇到的运算不封闭的问题, 设计了能够承载该网络编码机制的网络编码节点模型, 从而保证该网络编码机制能够在全光异或门和光移位寄存器等主要光器件的支持下在光网络中实施. 最后, 对该网络编码节点模型所涉及到的部分关键模块进行了实验分析, 结果表明模块能够完成所期望的功能.

关键词: 光网络; 网络编码; 逻辑运算; 编码节点

中图分类号: TN929; TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012) 07-1304-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.07.003

Logic-Calculations-Based Optical Network Coding Mode

QU Zhi-jian¹, BAI Lin², LIU Xiao-hong¹

(1. School of Computer Science and Technology, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Linear network coding scheme is hard to be introduced to optical networks for the reason of lacking optical random access memory. To introduce network coding to optical networks, a two channels optical network coding scheme based on optical logic shift and XOR operations was presented. The scheme can be realized in photonic domain without OEO conversion and more universal than XOR network coding scheme. Moreover, to solve the problem of operations unclosed when performing the scheme, a network coding node structure which can support the scheme was designed. The coding node can ensure the scheme being accomplished in optical networks through the all-optical XOR gate and the all-optical shift register. Experiment results of some key modules of the coding node were presented. The results indicated that the modules can realize the required functions.

Key words: optical networks; network coding; logic calculations; encoding node

1 引言

网络编码^[1]将原先分立于物理层和网络层的编码和路由两个核心概念有机的融为一体, 彻底改变了传统的存储转发模式, 建立起一种全新的网络体系结构及信息编码和传输模式. 网络编码具有提高网络吞吐量、均衡网络负载、增加网络带宽的利用率、减少网络资源损耗、提高网络安全性、减少能量消耗等优点, 为设计具有更高容量与更加优化的未来网络提供了切实可行的支持.

网络编码按照节点输出和输入的关系可划分为线性网络编码^[2]和非线性网络编码^[3]. 目前网络编码理论研究已经证明, 通过线性网络编码就可以获得点到多点

组播网络中的最大流上限, 非线性网络编码由于其编解码的复杂度极高, 实现代价大, 所以在一般研究较少涉及^[4].

线性网络编码技术要求把组播网络中的信源信息看作是特定基域上的向量, 并在中间编码节点对信息进行编码处理时只对接收到的信息进行线性组合变换, 需要在保证编码向量之间线性无关的基础上进行线性运算. 网络编码的运算复杂程度随着路径数量的增加而增加.

将网络编码技术引入到光网络中, 可以在光网络高速、宽带的基础上充分结合网络编码在提高组播吞吐量、增加资源利用率、均衡网络负载等多方面的优势^[5~7]. 但是, 由于受到光信号本身特性的影响以及当

前光器件的限制,要将网络编码技术应用到光网络当中并充分发挥光网络和网络编码两者的优势还面临很多的挑战。

首先,光网络中信息的复制多是通过星型耦合器等光功率分配器件再加上光交换矩阵和波长变换器组成,光交换/路由设备的结构设计受到很大限制,不具备电路路由器的灵活性。

其次,在光域上实现线性网络编码运算几乎是不可能的。若将光信号调制成电信号后,在电域中完成网络编码运算后再将所得编码信号重新调制到光域进行传输是一个可行的方案,但是这种非透明的光网络处理方法必将增加网络代价、降低网络性能,劣化网络编码和光网络原本卓越的优势。

最后,编码节点的编解码运算在一定程度上增加了网络运算复杂度,需要折中考虑网络编码的增益与复杂度,在组播网络中尽量使用低复杂度、增益较大的网络编码算法。在光组播网络中,网络编码的这一影响尤其明显。

在光网络中如何构造简单、快捷、可行的网络编码向量成为研究的一个重要问题之一。目前存在的光层网络编码算法或者使用逻辑异或实现^[8,9],或者将传统线性网络编码经光电光转换后在光网络中实现^[10,11]。异或网络编码实现容易,但是适用范围窄,对组播网络物理结构有特殊要求,缺少普遍性;光电光转换方法容易增加系统实现代价,降低系统性能并给网络带来额外开销,故在光网络中一般情况下不予采用。

随着光器件的发展,在光域中可以快速、容易的实现逻辑异或^[12]和逻辑移位^[13]操作。无溢出的逻辑左移表示乘法运算,用逻辑异或取代传统的加法运算,两种运算结合可以在光网络中实现编码操作。因此,在光网络中使用逻辑异或和移位操作从而避免使用光-电-光转换完成网络编码已成为目前一种切实可行的方案。本文在前期工作^[5~7]的基础上提出了一种能够在光层实现的基于逻辑运算的双路径网络编码机制,并设计编码节点模型承载运行该网络编码机制。

2 基于逻辑运算的光网络编码机制

为了实现基于逻辑异或和逻辑移位运算的双路径光层网络编码机制,必须首先设计完成支持逻辑运算的网络编码向量集。根据逻辑运算的特点设计的网络编码向量集合为: $U = \{p_n = (1, 2^n)^T | n \in \mathbb{N}\}$ 和 $V = \{q_m = (2^m, 1)^T | m \in \mathbb{N}, m > 0\}$, 其中, p_n 和 q_m 为列向量, \mathbb{N} 为自然数集。该网络编码机制在实现网络编码运算时的编码向量选自集合 U 和 V 。

在该编码向量条件下,当基于网络编码的双路径组播树建立后并且所有编码节点在组播树中都确定

后,每一个编码节点(包括源节点)可以被分配一个编码向量集合中的编码向量 $(1, 2^x)^T$ 或者 $(2^y, 1)^T$, 其中, $0 \leq x \leq n, 1 \leq y \leq m$ 。从 x, y 的取值可以看出编码向量集合中共包括 $m + n + 1$ 个编码向量,其中参数 m 和 n 可以由组播树中的编码节点数量确定。确定原则为:假设组播树中有 t 个编码节点,那么可以确定 $m + n + 1 = t$, 此外,从编码向量资源有效利用和网络编码计算简单的角度来说达到 $\min(|y - x|)$ 最好。

设计这样编码向量的出发点是考虑到传统的乘 2^n 运算可以通过左移被乘数 n 位实现,能够在光域中通过移位操作完成。此外,在将编码向量运用到网络编码操作过程中为避免数据移位溢出,需要对数据包的数据部分最高 $m + n$ 位进行预留,并且初始化为“0”。

如图 1 所给出的组播网络,其中节点 S 为组播源节点,假设信息“a”和“b”为源节点 S 同时向下游链路发送的两路不同信息,节点 C_1, C_2, C_3 和 C_4 为组播网络中的编码节点,并且这些编码节点分别被分配编码向量 $(1, 2)^T, (2, 1)^T, (1, 4)^T$ 和 $(4, 1)^T$, 节点 T_1, T_2, T_3 和 T_4 为组播目的节点,编码节点 C_1 和 C_2 中的网络编码运算过程如式(1)和式(2)所示。需要注意的是在公式中“ $*$ ”运算符表示矩阵逻辑乘法运算,在矩阵逻辑乘法运算中,传统的“加法”运算由“逻辑异或”运算代替。

$$(a, b) * (1, 2)^T = (a \oplus 2b) \quad (1)$$

$$(a, b) * (2, 1)^T = (2a \oplus b) \quad (2)$$

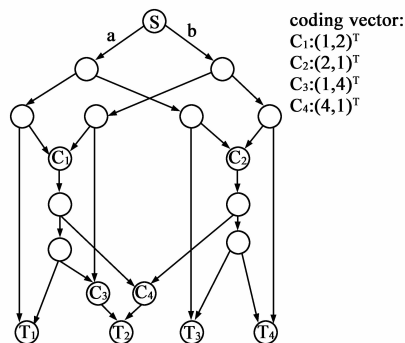


图1 网络编码过程示例

根据传统网络编码的实现过程,此时编码节点 C_1 和 C_2 的输出结果应该分别为“ $a \oplus 2b$ ”和“ $2a \oplus b$ ”。从硬件实现的角度来说“ $a \oplus 2b$ ”可以通过在编码节点 C_1 中对原始数据“b”左移 1 位后与原始数据“a”进行异或运算后实现。同样“ $2a \oplus b$ ”可以通过在编码节点 C_2 中对原始数据“a”左移 1 位后与原始数据“b”进行异或运算后实现。

$$\begin{aligned} ((a \oplus 2b), b) * (1, 4)^T &= ((a \oplus 2b) \oplus 4b) \\ &= (a \oplus 2b \oplus 4b) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} ((a \oplus 2b), (2a \oplus b)) * (4, 1)^T &= (4(a \oplus 2b) \oplus (2a \oplus b)) \\ &= (4a \oplus 8b \oplus 2a \oplus b) \end{aligned} \quad (4)$$

在图1中,编码节点 C_3 的输入信号分别为“b”和“ $a \oplus 2b$ ”,编码节点 C_4 的输入信号分别为“ $a \oplus 2b$ ”和“ $2a \oplus b$ ”.如果编码节点 C_3 和 C_4 仍然采用线性网络编码实现过程完成网络编码运算,编码结果分别如式(3)和式(4)所示.

从上述结果可以看出,当原始信息“a”和“b”经过两次以上的逻辑编码运算后得到的编码结果的系数向量将不再是2维的,也即经过多次逻辑运算后网络编码结果的系数向量相对编码向量集合是不封闭的.这主要是因为对逻辑运算而言,式(5)在绝大多数情况下是成立的.

$$2^n a \oplus 2^m a \neq (2^n + 2^m) a, n, m \in \mathbb{N} \quad (5)$$

事实上,经过逻辑运算后的编码结果的系数向量维数 d 范围满足 $1 \leq d \leq k$,其中变量 k 由编码次数决定.另一方面,当式(5)左右两端相等的条件下表达式 $2^n + 2^m$ 在绝大多数情况下也不等于 2^t ,其中 $m, n, t \in \mathbb{N}$ 并且 $t > n, m$.这就说明信号“ $(2^n + 2^m)a$ ”在绝大多数情况下不能通过左移信号原始“a” $m+n$ 位实现.这种情况最终将导致目的节点由于没有相对应的逆运算而无法正确解码,造成基于逻辑运算的网络编码机制失败.

此外,基于逻辑运算的光层网络编码机制的实现过程不同于线性网络编码.对线性网络编码机制而言,所用到的编码向量选自独立的线性空间,在编码节点中有效信息和线性无关的编码向量直接进行相应的线性运算就可以完成网络编码运算,并能保证目的节点通过相对应的线性逆运算正确解码.然而这一过程并不适用于基于逻辑运算的网络编码机制.在基于逻辑运算的网络编码机制下,当信源发出的原始信息按照

传统的线性网络编码过程经历多级网络编码运算以后,信宿将无法从最终接收到的编码信息中还原原始信息.导致这一问题的主要原因是由于原始信息传输过程中历经多级编码节点对其进行了多次移位和异或运算,在目的节点没有相应的逆运算用于解码.

为了保证在基于逻辑运算网络编码机制下所有目的节点能够正常解码,要求编码结果的系数向量维数必须维持在2维,并且保证系数向量中的每个元素均能通过逻辑移位运算得到,即保证系数向量中每个元素为 2^t ,其中 $t \in \mathbb{N}, t \geq 0$.为了达到这一目的,在实现网络编码的过程中允许每个编码节点根据接收到的信息类型首先对接收到的数据包进行解码,而后根据分配给该编码节点的编码向量对解码后得到的原始数据进行再编码.本文在我们前期对光网络编码机制研究^[5~7]的基础上对承载该网络编码机制的编码节点进行研究.

3 光网络编码节点模型

承载基于逻辑移位和逻辑异或运算光层网络编码机制的编码节点结构图如图2所示.该网络编码节点模型主要包括:控制部件(Control Center),交换部件(Optical Cross-Connect, OXC),光分路器(Optical Power Splitter, OPSP),光纤延迟线(Fiber Delay Line, FDL),全光异或门(All-Optical XOR Gate),光移位寄存器(Optical Shift Register, OSR)以及光信号放大器件(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA).该编码节点的主要功能是用于实现基于逻辑移位和逻辑异或运算的光层网络编码机制.

为了说明编码节点的工作过程,首先定义输入数据如式(6)和式(7)所示.

$$(a, b) * (v_{11}, v_{12})^T = (v_{11}a \oplus v_{12}b) \quad (6)$$

$$(a, b) * (v_{21}, v_{22})^T = (v_{21}a \oplus v_{22}b) \quad (7)$$

式(6)和式(7)表示了数据包在上游编码节点的产生过程.其中“a”和“b”代表了源节点发出的原始数据;向量 $(v_{11}, v_{12})^T$ 和 $(v_{21}, v_{22})^T$ 为上游节点完成编码运算所用到的编码向量,其中 $v_{ij} = 2^m (m \geq 0), (i = 1, 2 \text{ and } j = 1, 2)$.为了保证编码向量的独立性,编码向量的系数 v_{11}, v_{12}, v_{21} 和 v_{22} 具有如下关系:如果 $v_{11} = v_{12}$ 那么 $v_{21} \neq v_{22}$,反之亦然;或者有 $v_{11} \neq v_{12}$ 并且 $v_{21} \neq v_{22}$.此外,根据上述定义编码向量 $(v_{11},$

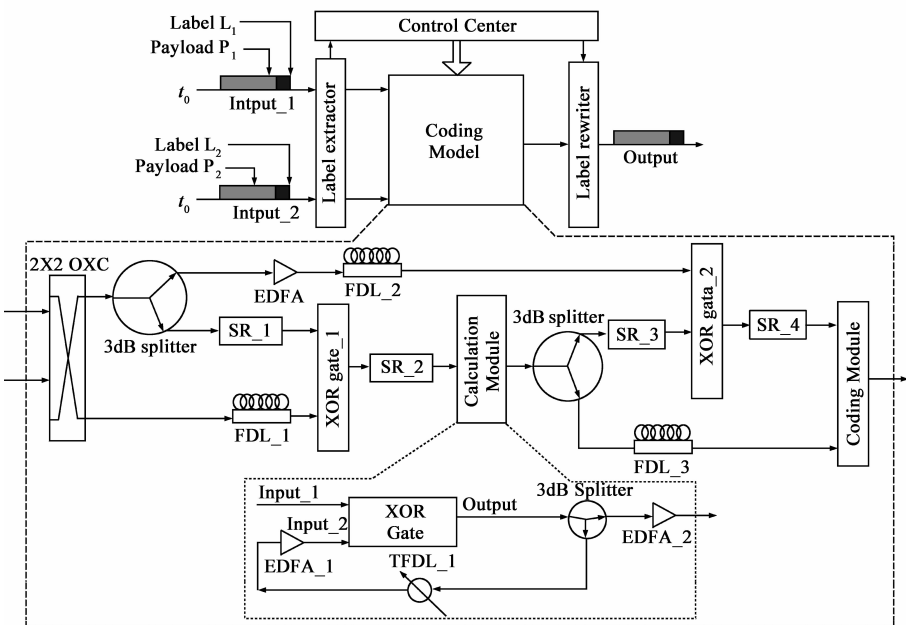


图2 网络编码节点模型图

v_{12}^T 可以表示为 $(1, v_{12}/v_{11})^T$ 如果 $v_{11} < v_{12}$, 或者 $(v_{11}/v_{12}, 1)^T$ 如果 $v_{11} > v_{12}$. 同样, 编码向量 $(v_{21}, v_{22})^T$ 也可以如上表示. 式(6)和式(7)右边的两个运算结果为当前编码节点(图2)输入的数据.

当编码节点接收到两个具有标签分别为 L_1 和 L_2 载荷分别为 P_1, P_2 的数据包时, 编码节点的控制中心根据提取的标签中包含的编码标志和编码向量控制交换部件 OXC 将其中一个数据包载荷发送到移位寄存器 SR_1 中, 进行移位操作. 发送到移位寄存器 SR_1 的载荷根据如下规则确定: 如果 $v_{22} \geq v_{12}$, 发送 $v_{11}a \oplus v_{12}b$ 到 SR_1; 如果 $v_{22} < v_{12}$, 发送 $v_{21}a \oplus v_{22}b$ 到 SR_1. 假设 $v_{22} \geq v_{12}$, 控制中心根据获取的编码向量控制移位寄存器 SR_1 左移输入数据 " $v_{11}a \oplus v_{12}b$ " $\log_2 v_{imp}$ 位, 其中, $v_{imp} = v_{22}/v_{12}$. 移位寄存器的移位运算如式(8)所示.

$$(v_{11}a \oplus v_{12}b)v_{imp} = v_{11}v_{imp}a \oplus v_{22}b \quad (8)$$

然后, 移位寄存器 SR_1 的输出 $v_{11}v_{imp}a \oplus v_{22}b$ 与该编码节点的另外一路被光纤延迟线 FDL_1 延迟的输入数据 $v_{11}a \oplus v_{12}b$ 一同被发送到光异或门 XOR gate_1 中进行异或运算, 运算结果如式(9). 式(9)可以转换为式(10), 其中 $p \neq q$ and $p, q \geq 0$. 因为如上所述有定义 $v_{ij} = 2^m$ ($m \geq 0$), ($i = 1, 2$ and $j = 1, 2$).

$$(v_{11}v_{imp}a \oplus v_{22}b) \oplus (v_{11}a \oplus v_{12}b) = v_{11}v_{imp}a \oplus v_{21}a \quad (9)$$

$$v_{11}v_{imp}a \oplus v_{21}a = 2^p a \oplus 2^q a \quad (10)$$

$$\frac{2^p a \oplus 2^q a}{2^{\min(p, q)}} = 2^{(\max(p, q) - \min(p, q))} a \oplus a \quad (11)$$

根据光网络编码机制, 运算过程中需要从中间结果 $2^p a \oplus 2^q a$ 中获取原始数据. 将 $2^p a \oplus 2^q a$ 发送到移位寄存器 SR_2 中右移 $\min(p, q)$ 位, 运算过程如式(11)所示. 然后, 移位寄存器 SR_2 的输出结果 $2^{(\max(p, q) - \min(p, q))} a \oplus a$

被发送到编码节点中的计算模块 (calculation module) 中解码原始数据 a, 运算过程和原理详见文献[5].

运算模块的输出为原始数据 a, 其被光分路器 (3dB splitter) 复制. 其中一个副本被光纤延迟线 FDL_3 缓存, 另外一个副本被发送到移位寄存器 SR_3 中左移 $\log_2 v_{11}$ 位变为 $v_{11}a$. 在光异或门 XOR gate_2 中, 数据 $v_{11}a$ 与被 FDL_2 缓存的输入数据 $v_{11}a \oplus v_{12}b$ 的另一副本进行异或运算得到数据 $v_{12}b$. 然后, 数据 $v_{12}b$ 被发送到移位寄存器 SR_4 中右移 $\log_2 v_{12}$ 位, 变为原始数据 b. 到此, 原节点发送的两路原始数据在编码节点中根据输入数据还原完成. 然后, 将得到的原始数据发送到编码模块 (coding module) 进行重新编码, 并改写数据包标签将编码标志置位, 将编码向量写入标签.

4 实验结果分析

首先, 采用异或网络编码的方式实验验证了光层网络编码机制的可行性, 搭建了研究网络编码常用的经典 7 节点蝴蝶拓扑, 共包含 7 个节点: 1 个组播源节点, 2 个组播目的节点, 1 个编码节点以及 3 个中间节点. 实验中, 源节点 s 同时发送两路速率为 2.5Gbps 数据到目的节点 D1 和 D2, 原始信息经过中间节点 1, 2 转发进入编码节点, 并在编码节点完成编码计算. 编码节点将编码结果经由中间节点 3 转发到目的节点. 在目的节点 D1 和 D2 中根据接收到的原始数据和编码数据进行解码从而完成解码功能. 图 3 为实验结构和结果图.

实验结果表明目的节点均能够同时正确接受源节点发送的两路信息, 即网络编码机制能够在光网络中实现. 该实验结果为网络编码在光网络中的可行性提供了可信的支持, 说明只要有适合的网络编码机制, 网络编码技术在光网络中完全可以实现, 进而为本文研究提供了现实意义.

在实验过程中有很多无法控制的诸如干扰, 光纤接头等外部因素, 导致信号恶化; 另外, 对光信号时序难于进行精确控制. 因此, 本文仅对提出的编码节点涉及到的关键部件分别进行了实验分析. 其中, 对提出的光网络编码节点模型中的关键运算模块 (calculation module) 的实验结果与分析详见文献[5]. 图 4 给出了网络编码节点中编码模块 (coding module) 的实验结果, 从实验结果可以看出该模块也能够完成提出的网络编码节点模型所要求的功能.

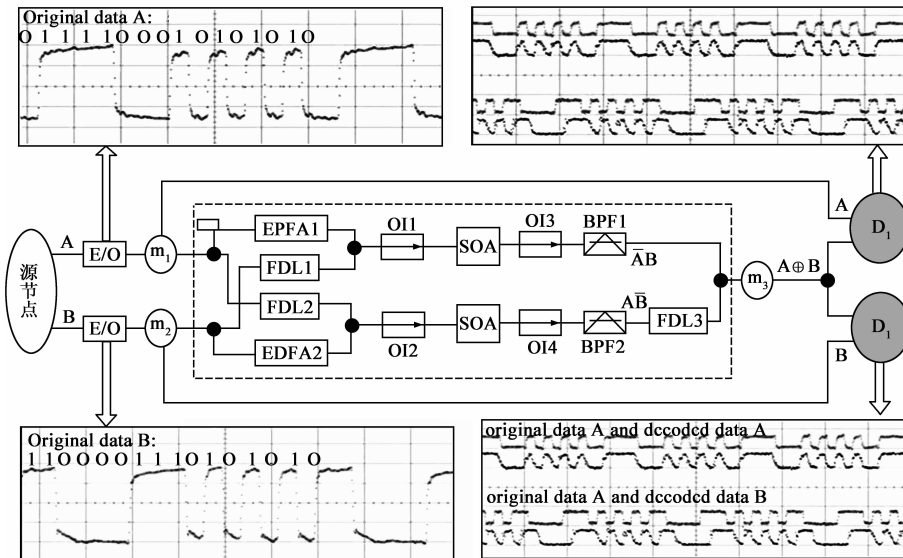


图3 光网络编码实验图

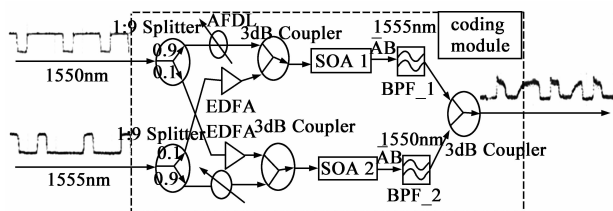


图4 编码模块实验结果

5 结论

基于逻辑移位和逻辑异或运算的网络编码机制在实现网络编码的运算过程由于运算不封闭,导致多级编码以后目的节点无法解码。针对这一问题,设计了支持该网络编码机制的网络编码节点模型,该编码节点模型首先根据编码向量对输入数据进行解码,然后再重新编码。这样可以保证编码后数据的系数矩阵保持在可解维数,从而保证目的节点能够正确解码。该网络编码模型能够在全光异或门和光移位寄存器等主要光器件的支持下实现。

参考文献

- [1] S Y R Li, R W Yeung, N Cai. Linear network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371 – 381.
- [2] GUANG Xuan, FU Fangwei. On random linear network coding for butterfly network[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(2): 283 – 286.
- [3] JIANG An-you, ZHU Jin-kang. Nonlinear network coding based on multiplication and exponentiation in $GF(2^m)$ Non-linear network coding based on multiplication and exponentiation in $GF(2^m)$ [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2009, 16(2): 53 – 57.
- [4] XIAO Song, WANG Hui, WU Chengke. A new network coding design for reliable video multicast[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(2): 361 – 364.
- [5] Zhijian Qu, Yuefeng Ji, Lin Bai, et al. key module for a novel all-optical network coding scheme[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(8): 753 – 756.
- [6] Y Sun, Z Qu, H Xing, L Bai, Y Ji. Optical-layer multicast based on network coding[A]. International Conference on Advanced Intelligence and Awareness Internet [C]. USA: IET Press, 2010. 1 – 13.
- [7] 曲志坚, 纪越峰, 柏琳, 等. 基于网络编码的双路径组播树生成算法[J]. 电子学报, 2009, 38(10): 2456 – 2459, 2464.

QU Zhi-jian, JI Yue-feng, BAI Lin, et al. An algorithm of establishing network coding-based two-disjoint path multicast tree [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2456 – 2459, 2464. (in Chinese)

- [8] E D Manley, J S Deogun, L Xu, et al. All-optical network coding [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(4): 175 – 191.
- [9] M Kim, Muriel Médard, Una-May O'Reilly. Network coding and its implications on optical networking [A]. Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) [C]. USA: Optical Society of America, 2009. 1 – 13.
- [10] Ronald C Menendez, Joel W Gannett. Efficient, fault-tolerant all-optical multicast networks via network coding [A]. Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) [C]. USA: Optical Society of America, 2008. 1 – 3.
- [11] Martin Belzner, Herbert Haunstein. Network coding in passive optical networks [A]. IEEE International Symposium on Network Coding [C]. USA: IEEE Press, 2009. 1 – 6.
- [12] M Zhang, L Wang, P Ye. All-optical XOR logic gates: technologies and experiment demonstrations [J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(5): s19 – s24.
- [13] Lazzeri E, Berrettini G, Meloni G, et al. All optical N-bits shift register exploiting a ring buffer based on semiconductor optical amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(1): 45 – 47.

作者简介



曲志坚 男, 1980 年 11 月出生于山东省青岛市。毕业于北京邮电大学获博士学位, 现在为山东理工大学计算机科学与技术学院讲师。研究方向为网络编码技术及其应用。

E-mail: zhijianqu@sdut.edu.cn



柏琳 女, 1965 年 7 月出生。北京邮电大学教授, 硕士生导师。研究方向为宽带通信网。

E-mail: bailin@bupt.edu.cn