

# 波分复用光网络模拟软件中的原子器件

程晓飞, 林绵峰, 张 杰, 顾婉仪

(北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

**摘 要:** 本文基于原子功能模型, 提出了原子器件的概念. 提出了利用原子器件建立 WDM 光网元设备对光信号的响应模型, 建立并分析了线性响应条件下光网络器件的原子功能数学模型. 给出了用于构建关键网元设备 OADM/OXC 的基本原子器件, 并讨论了模型运算关系和运算结果. 介绍了原子器件在光传送网模拟软件网元设备建模中的应用.

**关键词:** 波分复用; 光网络; OADM; OXC; 原子功能模型

**中图分类号:** TN929.18 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 11-1555-03

## Atomic Components for WDM Simulation Software

CHENG Xiao-fei, LIN Mian-feng, ZHANG Jie, GU Wan-yi

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In this paper, the atomic component is introduced based on atomic functional model. The method to build optical network elements model using atomic components is proposed. Atomic components necessary to build the key network elements (i. e. OADM/OXC) are given, the result is presented also. The application of atomic components is demonstrated in simulation software of optical transport network.

**Key words:** WDM; optical network; OADM; OXC; atomic functional model

## 1 引言

随着数据业务的急剧增加, 波分复用(WDM)光传送网越来越成为人们关注的热点. 高速、大容量的 DWDM 光网络中网元器件的结构和性能、网络性能、波长分配及路由算法、网络规划设计及组网方案等问题以及传输过程中光信号的演变特性等都成为人们研究的热点. 而硬件网络平台的相对固定性导致的配置不灵活性、高成本、效率低等固有点, 限制了对复杂光网络的研究. 而在软件平台上的研究具有灵活、方便和高效等优点. 因此, 软件模拟在光网络中的研究作用越来越重要. 光传送网的模拟软件也逐步成为人们研究波分复用光网络的重要工具.

建模问题是 WDM 光网络模拟软件中的关键问题之一. 本文讨论的原子功能模型主要针对波分复用光网元设备对光信号的响应模型. 原子功能是指在功能上将光网络中各种复杂的网元设备进行细化和抽象得到的设备最小功能单位<sup>[1]</sup>. 光网络中的任何复杂的网元设备在功能上可以看成是原子功能的复合. 为了使网元设备的数学模型更清晰, 我们引入原子器件的概念. 原子器件是指实现特定原子功能的一类理想器件, 它是原子功能模型的具体化. 原子器件可以更清晰地描述复杂网元的内部结构. 在结构上, 复杂的网元设备可以看成是原子器件的复合. 通过建立原子器件库, 可以将光网络常用的网元设备用原子器件替代, 并用它们来构成光传送网络的功能单元, 清晰简洁地表述了各种复杂模型的内部功能和结构, 简化了设备和网络的建模工作.

## 2 原子功能模型的数学描述

在 WDM 光网络中, 我们可以将网元设备的建模过程看成对输入参数进行信息加工并输出的过程. 光信号从源端经网元设备经若干次信息加工后输出到宿端. WDM 光网元设备的系统响应包括线性和非线性响应两部分. 输入光信号可能是单路或多路复用的信号. 对不同信道信号, 其通过的原子功能也可能不同. 当网元设备为线性响应系统时, 在功能上可以把它看成原子功能的级联. 网元设备的模型可以描述如下:

$$DATA.out = F_i(DATA.in) \quad (1)$$

$F_i$  为原子功能函数.  $F_i(DATA.in, n) = DATA.in, n$  表示第  $n$  路光通路不使用此原子功能. 可以证明, 当器件内的所有原子功能模型均满足线性响应系统时, 此器件也满足线性响应系统. 当原子功能模型  $M_i$  满足线性系统时, 可以把原子功能模型  $M_i$  看成是传递函数为  $h_i(t)$  的响应系统, 设输入为  $n$  路复用信号, 则输出信号为:

$$\begin{aligned} DATA.out &= DATA.in \odot h_1(t) \odot h_2(t) \odot \dots \odot h_n(t) \\ &= IFFT[FFT(DATA.in) \cdot H_1(f) \cdot H_2(f) \cdot \dots \cdot H_n(f)] \\ &= IFFT[FFT(DATA.in, 1 + \dots + DATA.in, n) \cdot H_1(f) \cdot \dots \cdot H_n(f)] \quad (2) \end{aligned}$$

符号  $\odot$  代表卷积,  $IFFT$  和  $FFT$  分别代表傅氏变换和逆傅氏变换处理,  $DATA.in, i$  表示输入的第  $i$  路复用信号. 由上式可以看出: (1)  $h_i$  的顺序不影响系统的输出, 即满足线性响应的网元设备, 其原子功能模型的连接顺序不影响设备的最后输出. (2)  $n$  个复用信道会相互影响, 产生串扰, 其具体影响程度同原子功能模型相关. 而对非线性响应系统的网元器件 (如光纤

等)建模时,我们在模拟软件建模的实际处理中直接将它看成是原子功能模型,不进行功能分解。

### 3 波分复用光网络中的原子器件

基本的原子功能包括<sup>[2]</sup>:适配功能、连接功能和终端功能。本文从光信号的各种处理功能归纳出光层需要的原子功能。在下面的公式中,用  $E_{in}$  代表输入信号的复振幅,  $E_{out}$  代表输出信号的复振幅。当  $n$  路信号复用时,  $E_{in\_i}$  代表输入的第  $i$  路复用信号复振幅,  $E_{out\_i}$  代表输出的第  $i$  路复用信号复振幅。我们用原子器件来代表相应的原子功能。光信号通过光网络传送时,可能涉及以下操作:功率的衰减、频率成分的变化、复合、分解以及选路等,与它们对应的原子器件分别是理想衰减器、光滤波器、信号复制器、理想合路器和理想光开关。它们的特性如下所示:

(1)理想衰减器 对输入光信号进行衰减,设衰减量为 dB。理想衰减器完成对输入光信号的衰减,衰减器改变了光信号的特征-复振幅,所以在功能属于适配功能。则:

$$E_{out} = E_{in} \cdot 10^{-\alpha/20} \quad (3)$$

(2)光滤波器 对光信号的频谱进行滤波。实际使用的滤波器有多种,但都可用滤波器的传递函数为  $h(t)$  来表示,即:

$$E_{out} = E_{in}(t) \odot h(t) \quad (4)$$

光滤波器改变了输入光信号的频谱,属于层内适配功能。

(3)信号复制器 信号复制器是指将输入信号理想地复制到所有输出端。它是为设备功能清晰化而提出的原子器件,适合于波分复用光网络。它完成对信号的复制过程,功能属于连接功能。满足:

$$E_{out\_1} = E_{out\_2} = \dots E_{out\_n} = E_{in} \quad (5)$$

(4)理想合路器 理想合路器是指将输入  $n$  路信号理想传送到输出端。它对输入光信号的合路,属于适配功能。即

$$E_{out} = E_{in\_1} + E_{in\_2} + \dots + E_{in\_n} \quad (6)$$

(5)理想光开关 理想光开关是指仅完成光信号的透明交换功能,而不影响信号其它特征的原子功能模型。它的参数是光开关的状态。对理想  $2 \times 2$  光开关,状态为:0、1 两种。0 代表平行态,光信号直通;1 代表交叉态,光信号交叉通过。理想光开关对信号进行透明交换,属于连接功能。

### 4 原子器件在 WDM 光网络常用器件建模中的应用

使用第 3 节介绍的的五种简单的原子器件,可以建立波分复用光网络中常用器件的数学模型。

#### (1)解复用器

波分复用光网络中的解复用器可以使用多种技术实现,这里用耦合器+滤波器来模拟 WDM 信号的解复用功能。

实际使用的各种解复用器,在功能上可看成各种原子功能的级连。对上图而言,解复用器功能包括信号复制器、光滤波器和理想衰减器三种原子器件。利用上节对原子器件的数学描述,容易得到第  $i$  信号输出为:

$$E_{out\_i} = [E_{in} \odot h_i] \cdot 10^{-\alpha/20} = [(E_{in\_1} + E_{in\_2} + \dots + E_{in\_n}) \odot h_i] \cdot 10^{-\alpha/20} \quad (7)$$

式中  $h_i$  为解复用器第  $i$  个滤波器的传递函数, 为解复用器

的衰减量,单位为 dB。由上式可以看出解复用器输出的第  $i$  路信号是输入所有复用信号  $E_{in\_1}$ 、 $E_{in\_2}$ ... $E_{in\_n}$  同  $h_i$  卷积的结果。可以看到,第  $i$  路输出信号  $E_{out\_i}$  不仅包括  $E_{in\_i}$  同  $h_i(t)$  的卷积项,同时还包括下式:

$$E_{out\_i} = [(\sum_{k=1, k \neq i}^n E_{in\_k}) \odot h_i] \cdot 10^{-\alpha/20} \quad (8)$$

解复用器产生的串扰即为式(8)所示。

#### (2)复用器

实际光网络的复用器有多种实现技术,解复用器反向工作即成为复用器,因此它的原子器件可如下表示:

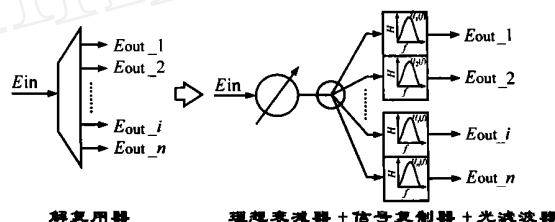


图1 解复用器的原子功能模型

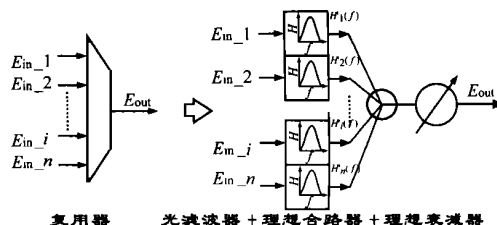


图2 复用器原子功能模型

同样,我们很容易得到输出信号  $E_{out}$  为:

$$E_{out} = [E_{in\_1} \odot h_1 + E_{in\_2} \odot h_2 + \dots E_{in\_n} \odot h_n] \cdot 10^{-\alpha/20} \quad (9)$$

式中  $h_i$  为复用器中第  $i$  个滤波器的传递函数。可以看到,当输入信号  $E_{in\_i}$  包含同、异频串扰时,通过光滤波器后,输入信号的同频串扰分量被大大削减,但同频串扰量却无法去除。而由耦合器构成的复用器(理想合路器+理想衰减器)则无法消除异频串扰分量。

#### (3) $2 \times 2$ 光开关

波分复用光网络中的光开关有:固体光开关、机械光开关、MEMS 光开关等。可以将  $2 \times 2$  光开关功能模型表示如下:

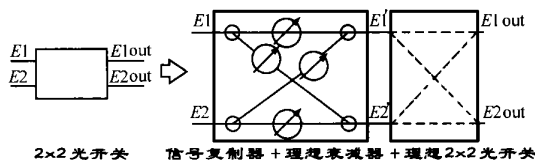


图3  $2 \times 2$  光开关的原子功能模型

由上面分析可得:

$$E_1 = E_1 \cdot 10^{-\alpha_1/20} + E_2 \cdot 10^{-\alpha_2/20} \quad (10)$$

$$E_2 = E_1 \cdot 10^{-\alpha_2/20} + E_2 \cdot 10^{-\alpha_1/20} \quad (11)$$

式中  $\alpha_{ik}$  代表从输入端口  $i$  到输出端口  $k$  的衰减量。

当交换态为平行态时,  $E_{1out} = E_1$ ,  $E_{2out} = E_2$  (12)

当交换态为交叉态时,  $E_{1out} = E_2$ ,  $E_{2out} = E_1$  (13)

## 5 原子器件在 WDM 光网络网元设备建模中的应用

### 5.1 在 OADM 建模中的应用

设 OADM 由解复用器、光开关、光滤波器构成<sup>[5]</sup>。用原子功能模型将其分解后,可以表示为:

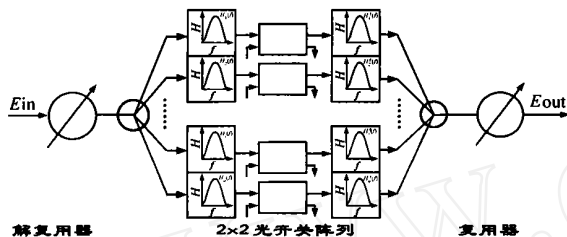


图4 OADM的原子功能模型

其中光开关的状态决定光信道的上下路情况。当我们假设光开关均为平行态,即没有上下路信号直通时,可以很容易得出输出信号为:

$$\begin{aligned}
 E_{out} &= \sum_{i=1}^n \{ [ ( E_{in\_i} \odot h_i ) \cdot 10^{-\frac{1}{20}} \cdot 10^{-\frac{2}{20}} ] \odot h_i \} \cdot 10^{-\frac{3}{20}} \\
 &= \sum_{i=1}^n [ ( E_{in\_i} + \sum_{k=1, k \neq i}^n E_{in\_k} \odot h_i \odot h_i ) \cdot 10^{-\frac{1+2+3}{20}} ] \\
 &= \{ E_{in\_1} \odot [ h_1 \odot h_1 + \sum_{k=2}^n ( h_k \odot h_k ) ] \\
 &\quad + E_{in\_2} \odot [ h_2 \odot h_2 + \sum_{k=1, k \neq 2}^n ( h_k \odot h_k ) ] + \dots \\
 &\quad + E_{in\_n} \odot [ h_n \odot h_n + \sum_{k=1, k \neq n}^n ( h_k \odot h_k ) ] \} \cdot 10^{-\frac{1+2+3}{20}} \quad (14)
 \end{aligned}$$

中<sub>1、2、3</sub>分别是解复用器、光开关、复用器的衰减量, $h_i(t)$ 为解复用器所含的滤波器的传递函数, $h_i(t)$ 为复用器中的滤波器传递函数。从上式中可以看到在光开关直通时 OADM 的输出信号中其它信号的串扰关系。上式既反映了 $E_{in\_i}$ 信道

对其他信道的串扰量: $E_{in\_i} \odot [ \sum_{k=1, k \neq i}^n ( h_k \odot h_k ) ]$ ,又反映了其他

信道对 $E_{in\_i}$ 信道的串扰量: $\sum_{k=1, k \neq i}^n E_{in\_k} \odot h_i \odot h_i$ 。

### 5.2 在 $N \times N$ 光开关中的应用

$N \times N$  光开关可由若干  $2 \times 2$  光开关搭建成,也可以是集成式  $N \times N$  光开关。集成式光开关的原子功能模型可以表示如下:

$$E_i = E_i \cdot 10^{-(ii)/10} + \sum_{k=1, k \neq i}^n E_k \cdot 10^{-(ki)/10} \quad (15)$$

图中未画出任意输入端到输出端的理想衰减器。上式中: $ik$ 是第 $i$ 路输入到第 $k$ 路输出的信号的衰减量。很显然,公式中第二项表示为其他路信号对第 $i$ 路信号为串扰项。当使用若

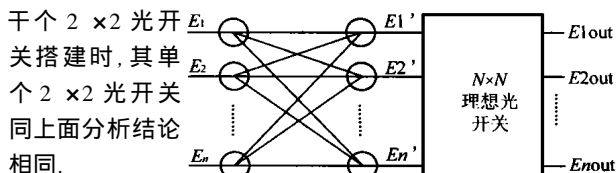


图5  $N \times N$  光开关原子功能模型

### 5.3 在 OXC 建模的应用

OXC 建模同 OADM 类似,OXC 结构可分为三级:输入级、交换级、输出级。交换颗粒有三种:波长交换、波长组交换、光纤交换。不同颗粒信号的交换主要体现在输入、输出级的结构上。对具体的 OXC 结构可用原子器件来构成,其分析同 OADM 类似。

## 6 原子器件在 WDM 光网络模拟软件中的应用

原子器件在 WDM 光网络模拟软件中的应用具有重要的意义:(1)使得软件用户能清楚地了解传送设备功能结构和工作原理,便于软件使用。(2)用户能方便的对复杂设备参数的进行配置。(3)用原子器件设计的软件系统高度灵活,并具有很好的维护性能和扩充性,能很方便的添加、删除和修改设备的内部结构。(4)能够利用原子器件库任意搭配功能设备,按用户需求构建功能设备,具有重要的研究意义。

## 7 结束语

原子器件建模方法,对网络的研究颗粒细化到“原子”量级,极大地简化了网络中各种模型的复杂程度。原子器件库可以为网络器件和设备所共享,提高了模拟软件中器件/设备建模的效率,大大增强网络研究的灵活性和扩展性。可以预见,随着波分复用光网络软件模拟的重要性提高,原子器件将会得到广泛的应用。

### 参考文献:

- [1] ITU-T Rec. G. 798. Characteristics of Optical Transport Network (OTN) Equipment Functional Blocks [S]. 1998
- [2] ITU-T Rec. G. 805. Generic functional architecture of transport networks [S]. 1996.
- [3] ITU-T Rec. G. 872. Architecture of optical transport networks [S]. 1998.
- [4] ITU-T Rec. G. 783. Characteristics of SDH equipment functional blocks [S]. 1996.
- [5] 顾婉仪,张杰.全光通信网[M].北京:北京邮电大学出版社,1999:56-64.

### 作者简介:



程晓飞 男,1974年7月出生于江西省庐山,1999年毕业于南京理工大学,获硕士学位。现为北京邮电大学电信工程学院99级博士生,主要研究方向是WDM光网络性能研究。