

В. С. МАРЧУК, канд. техн. наук, Т. В. ВЕЛИЧКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОГО ТИПА НА ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ WDM И DWDM

Развитие оптоволоконных сетей связи идёт как по пути увеличения скорости передачи (в технологии SDH / SONET – от STM-1 до STM-64 со скоростями от 155 Мбит/с до 10 Гбит/с и выше на последующих ступенях иерархии) по схеме «одно волокно—один канал», так и по пути применения технологии спектрального мультиплексирования оптических каналов [1, 2].

Разрабатываются технологии и аппаратура полностью оптических сетей AON с коммутацией оптических несущих, каналов и пакетов и их оптической маршрутизацией. Эффективность функционирования таких сетей во многом зависит от электрических характеристик оптических мультиплексоров (ОМП). Требования к ОМП возрастают по мере освоения технологий волнового WDM, плотного волнового DWDM и сверхплотного волнового HDWDM мультиплексирования.

В работе [3] описаны достаточно простые конструкции ОМП на основе дифракционной решётки (ДР) (рис. 1). Такие ОМП использовались при достаточно большом разнесении оптических каналов по длине волны 25 нм и более. Представляет интерес исследование возможностей использования простых ОМП на основе ДР для систем WDM и DWDM с существенно меньшим разнесением оптических каналов.

Рассматриваемое устройство представляет собой спектрометр автоколлимационного типа. Автоколлимационная схема (рис. 1) позволяет реализовать наиболее компактное устройство на дифракционной решетке 2, поскольку один и тот же оптический элемент (линза) 3 является и коллимирующим, и фокусирующим. При этом роль входных и выходных щелей выполняют сердцевинки входных и выходных волокон 1, которые закреплены в держателе 4.

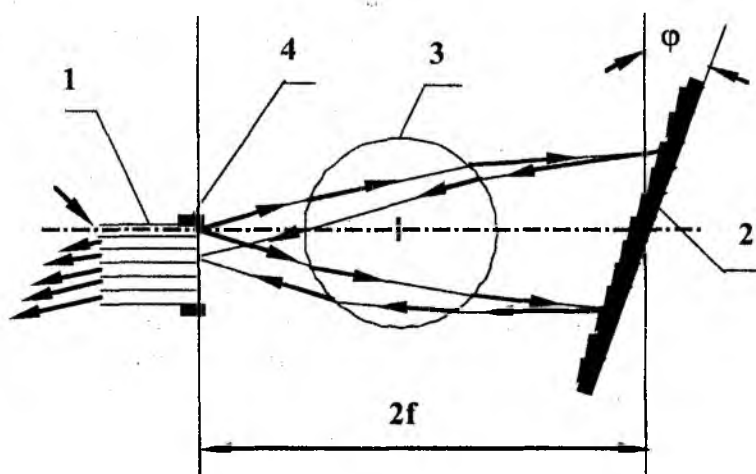


Рис. 1

В автоколлимационной схеме линейное увеличение оптической системы равно 1. Поэтому при использовании безабберационного фокусирующего элемента диаметры «цветных» изображений сердцевинки входного ОВ равны диаметру самого ОВ ($d_c'(\lambda_c) = d_c$). Кроме того, апертуры пучков лучей на выходе фокусирующего элемента равны апертуре излучаемого из входного ОВ пучка лучей ($NA' = NA$). В реальном устройстве фокусирующий элемент обладает aberrациями, что приводит к aberrационному размытию изображения $d_c'(\lambda)$ и смещению центра изображения относительно приемного волокна.

Поскольку ход оптических лучей обратим, то ДР может работать как оптический демультимплексор ОДМП, если вход и выход поменять местами.

В ОМП входное и выходное ОВ – одномодовые, поэтому к качеству фокусирующего элемента, а также к точности изготовления и установки оптических элементов предъявляются повышенные требования.

Основные параметры ОМП ДР, выполненного по автоколлимационной схеме, определяются из соотношений теории спектральных приборов [4]:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{fN}{\cos \varphi^i}, \quad (1)$$

где $\frac{dl}{d\lambda}$ – линейная дисперсия, которая определяет степень пространственного разнесения двух волн, отстоящих друг от друга на расстоянии $\Delta\lambda$; N – число штрихов на 1 мм ДР; f – фокусное расстояние фокусирующего элемента.

Условием высокоэффективной работы ДР в заданном диапазоне длин волн является следующее соотношение:

$$\lambda_{\text{бл}} = \frac{2 \sin \varphi_{\text{бл}}}{N}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{бл}}$ – длина волны «блеска», т. е. длина волны, отражаемая ДР с наибольшей эффективностью; $\varphi_{\text{бл}}$ – угол «блеска» ДР, т. е. угол наклона плоскости штриха ДР к плоскости решетки.

Зависимость коэффициента отражения ДР от длины волны света в спектрах различных порядков определяется формулой

$$\eta(\lambda) = \left[\frac{\sin \pi \left(k - \frac{\lambda_{\text{бл}}}{\lambda} \right)}{\pi \left(k - \frac{\lambda_{\text{бл}}}{\lambda} \right)} \right]^2, \quad (3)$$

где k – порядок дифракции ($k = \pm 1, \pm 2, \dots$).

В соответствии с (3) при $\lambda_{\text{бл}} = \lambda = 1,55$ мкм и $k = 1$ имеем: $\eta(\lambda_{\text{бл}}) = 1$, а снижение коэффициента отражения на краях спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм составляет $\eta(1,5) = 0,996$ и $\eta(1,6) = 0,997$, соответственно.

Воспользуемся результатами расчетов [3] для зависимостей числа N штрихов ДР от фокусного расстояния линзового элемента f , рассчитанными по формуле (1) для различных значений спектрального разделения каналов $\Delta\lambda$, при условии, что расстояние между центрами приемных волокон, принадлежащих различным каналам, равно диаметру оболочки ОВ ($\Delta l = D = 125$ мкм). Этот случай плотной упаковки ОВ в приемной каскаде наиболее часто используется на практике. Там же, на рис. 2, построена кривая зависимости угла «блеска» ДР $\varphi_{\text{бл}}$ от числа штрихов N , рассчитанная в соответствии с формулой (2) для случая $\lambda_{\text{бл}} = 1,55$ мкм. Пользуясь номограммами рис. 2, можно по заданному спектральному разделению каналов $\Delta\lambda$ определить согласованные пары значений N и f , а затем по значению N найти необходимый угол «блеска» ДР ($\varphi_{\text{бл}}$).

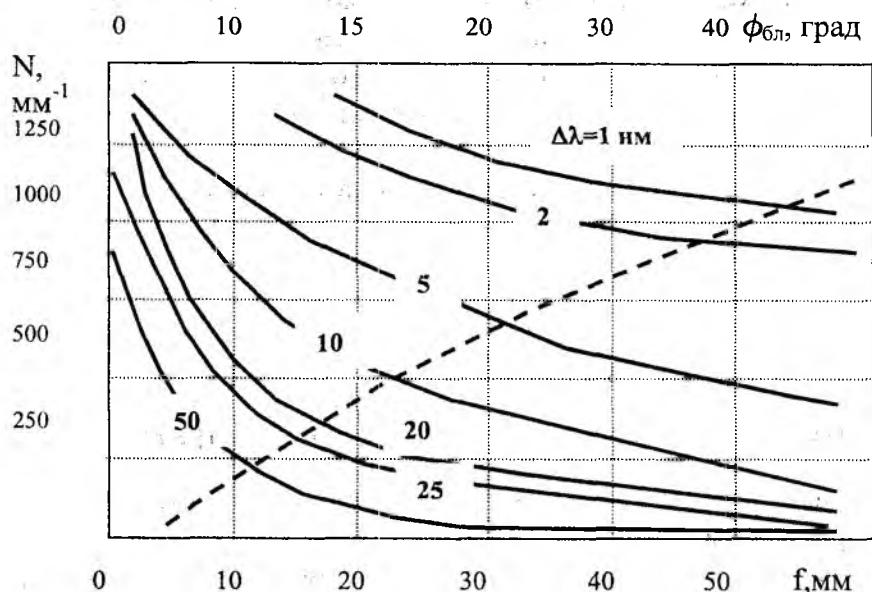


Рис. 2

Таким образом, исходя из заданного значения $\Delta\lambda$, можно определить основные параметры дифракционной решетки (N и $\phi_{\text{бл}}$) и фокусирующего элемента (f). Следует отметить, что, хотя значения N и f могут быть выбраны по номограммам достаточно произвольно, необходимо учитывать, что величина f определяет габариты устройства, а N и $\phi_{\text{бл}}$ ограничены технологическими возможностями (обычно $N = 1200 \text{ мм}^{-1}$ и $\phi_{\text{бл}} \leq 40^\circ$). Например, ДР с углом блеска $\phi_{\text{бл}} = 30^\circ$ в спектральном диапазоне 1,5–1,6 мкм должна иметь число штрихов $N = 650 \text{ мм}^{-1}$. По номограммам (рис. 2) можно определить, что такой ДР для разделения каналов с $\Delta\lambda = 25 \text{ нм}$ требуется фокусирующий элемент с $f = 6,5 \text{ мм}$, для разделения каналов с $\Delta\lambda = 5 \text{ нм}$ необходим более длиннофокусный элемент с $f = 32,5 \text{ мм}$, а для $\Delta\lambda = 3 \text{ нм}$ $f = 45 \text{ мм}$. Дополнительное уменьшение разнесения $\Delta\lambda$ оптических каналов приводит к существенному росту фокусного расстояния f .

На рис. 3 представлены графики зависимостей затухания от длины волны несущей в двух соседних оптических каналах ОМП ДР при разнесении каналов 3 и 4 нм, рассчитанные с помощью программы Matlab v.6.0.

Расчет проведен в соответствии с дисперсионным соотношением (1) и формулой потерь оптической мощности при поперечном смещении торцов ОВ

$$L = 10 \lg \exp \left\{ - \frac{\Delta l^2}{r_0^2} \right\}, \quad (4)$$

где Δl – смещение центра изображения выходного ОВ на торце приемного ОВ при изменении длины волны на $\Delta\lambda$; r_0 – радиус сердцевины ОВ.

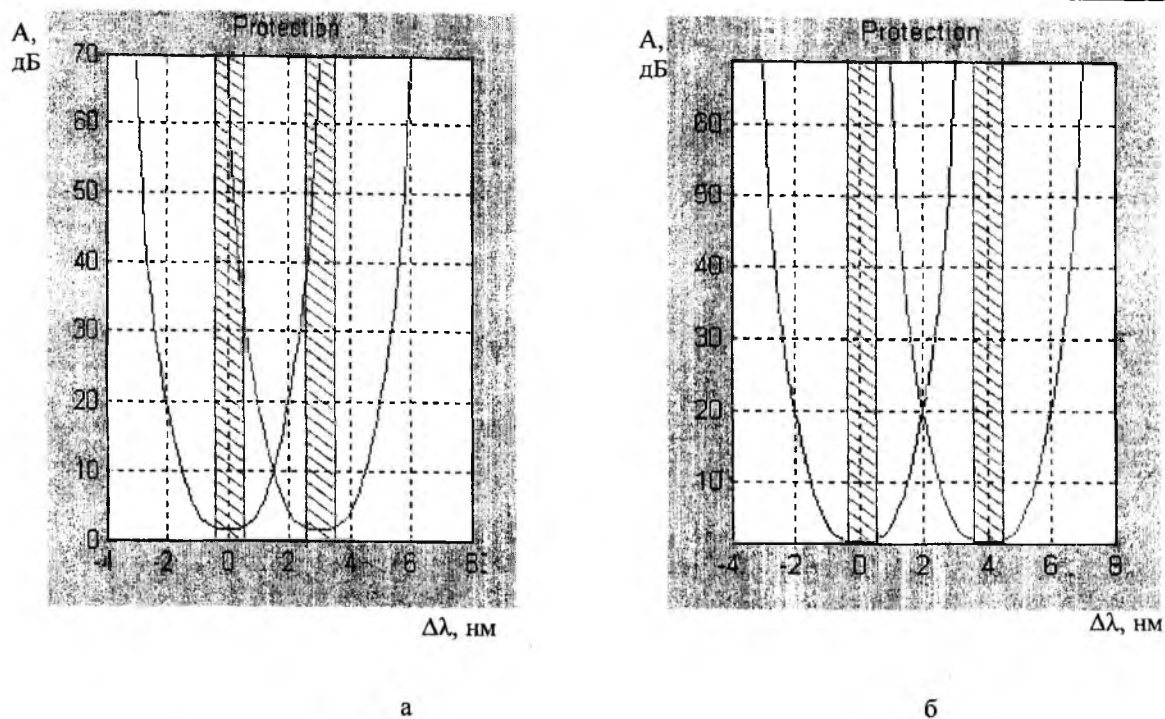


Рис. 3

На рис. 4 представлен график зависимости взаимной защищённости A_3 от разнесения оптических каналов $\Delta\lambda$.

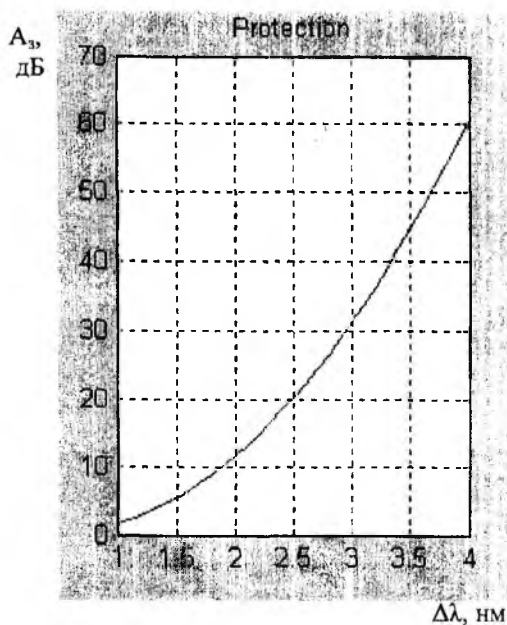


Рис. 4

Минимальные потери в соответствии с оптической схемой ОМП (см. рис. 1) определяются потерями на френелевское отражение (ФО) от поверхностей линз, дифракционной эффективностью ДР и потерями на френелевское отражение на торцах ОБ:

$$L_{\min} = L_{\text{л}}^{\text{Ф0}} + L_{\text{ДР}} + L_{\text{ОВ}}^{\text{Ф0}}. \quad (5)$$

Потери на френелевское отражение от двух поверхностей линзы без просветления покрытий на границе с воздухом составляют: $L_{\text{л}}^{\text{Ф0}} = 10 \cdot 1g(1 - 0,04)^4 = 0,71$ дБ. Здесь коэффициент 0,04 есть коэффициент отражения на границе раздела воздух–стекло ($n = 1,5$). Потери ДР при дифракционной эффективности 90% составляют: $L_{\text{ДР}} = 10 \cdot 1g 0,9 = 0,46$ дБ. Потери на френелевское отражение на торцах ОВ – $L_{\text{ОВ}}^{\text{Ф0}} = 0,35$ дБ. Таким образом, полные минимальные потери $L_{\min} = 1,52$ дБ.

На рис. 3 представлен график зависимости межканальной защищённости A_3 от величины разнесения оптических каналов $\Delta\lambda$ при условии, что спектр модулирующего сигнала имеет полосу $\Delta\lambda_{\text{п}} = 1$ нм. Для STM–64 со скоростью передачи в 10 Гбит/с при использовании для меандра спектра с 6-ю гармониками: $F_0 = N/2$, $3F_0$, $5F_0$, $7F_0$, $9F_0$, $11F_0$, получим $0,5 \Delta F = (11/2) N = 55$ ГГц, где N – битовая скорость. Полоса $\Delta F_{\text{п}}$ составит 110 ГГц, что соответствует $\Delta\lambda_{\text{п}} = 0,88$ нм.

Следует учесть, что гармоники выше $3F_0$ несущественно улучшают качество импульсов, а значит можно сузить полосу $\Delta F_{\text{п}}$. Однако на практике равенство пауз и длительности импульсов, как правило, не выполняется, поэтому спектр цифрового сигнала будет отличаться от спектра меандра и сужать полосу $\Delta F_{\text{п}}$ следует с осторожностью, проанализировав предварительно вид цифровой последовательности в реальной системе связи.

В соответствии с рекомендациями ITU – T частотный план DWDM предусматривает разнесение каналов в 100 ГГц ($\Delta\lambda = 0,8$ нм), 200 ГГц ($\Delta\lambda = 1,6$ нм), 400 ГГц ($\Delta\lambda = 3,2$ нм), 500 ГГц ($\Delta\lambda = 4$ нм) и 1000 ГГц ($\Delta\lambda = 8$ нм) с числом мультиплексируемых оптических каналов 41, 21, 11, 8 и 4 соответственно.

Выводы

1. Оптические мультиплексоры автоколлимационного типа на ДР можно использовать в сети WDM и DWDM.
2. Целесообразно использовать ОМП ДР при разнесении оптических несущих 1000, 500 и 400 ГГц с числом каналов от 4 до 11. В этом случае межканальная защищённость составит 33 дБ и более для полосы пропускания канала 1 нм по длине волны.
3. Использование в ОМП ДР разнесения оптических несущих 200 ГГц с числом каналов 21 дает межканальную защищённость всего 10 дБ, что для полосы пропускания канала 1 нм по длине волны не достаточно.
4. В случае снижения требуемой скорости передачи сигнала в оптическом канале ниже 10 Гбит/с возможна передача 21 оптического канала с разнесением 200 ГГц.
5. Уменьшение разнесения оптических каналов приводит к увеличению фокусного расстояния и размеров ОМП ДР.

Список литературы: 1. Слепов Н.Н. Современные технологии оптоволоконных сетей связи. М.: Радио и связь, 2000. 468 с. 2. Убайдулаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2000. 267 с. 3. Орбинский С.П., Миронов С.А., Богатырёв А.И., Лобанова Е.С. Расчёт характеристик устройств спектрального объединения и деления на дифракционной решётке // Техника средств связи: Науч. техн. сб., Вып. 6. 1990. С. 11 – 22. 4. Козанне А., Флере Ж., Руссо М. Оптика и связь. М.: Мир, 1984. 465 с.