

新能源电厂的可重构高透明度光通信技术

赵婷¹, 徐杰¹, 陈璞¹, 曾铮¹, 谢文武²

(1. 国网湖北省电力公司信息通信公司, 武汉 430079;

2. 湖南理工学院信息科学与工程学院, 湖南岳阳 414006)

摘要: 随着新能源技术的迅猛发展, 使得数据光通信呈现出一种爆炸式增长态势, 因此其安全性、可靠性、管理方式等都成为在电力光通信网管理工作中急需考虑的问题, 并需要优化相应的新能源电厂光通信并网的管理方式; 提出了一种高透明度、可重构性的波长转换方案, 并提出了最优驱动条件; 通过理论推导、仿真模拟和实验分析, 验证了该驱动条件可以使波长转换具有最高转换效率和误比特率性能, 同时验证了该波长方案可以动态可控地调整转换波长的频率, 对转换信号几乎没有波形损伤等优点。

关键词: 新能源电厂; 光通信; 波长转换; 高透明度

A High-transparency and Reconfigurable Optical Communication Technique of New Energy Plants Based on DP-MZM

Zhao Ting¹, Xu Jie¹, Chen Pu¹, Zeng Zheng¹, Xie Wenwu²

(1. State Grid Hubei Information & Tele-Communication Company, Wuhan 430079, China;

2. Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

Abstract: With the rapid development of new energy technology, optical communication data resource presents an explosive growth. Therefore, the corresponding safety, reliability, and management have become the urgent problems in the optical communication network management, meanwhile, the optical interconnection management of new energy power plant need to be optimized. A high-transparency and reconfigurable wavelength conversion is proposed. Moreover, the optimal operation conditions are deduced. Through theoretical derivation, simulation and experimental analysis, the optimal conditions are demonstrated to ensure the converter has optimal performance, in terms of the converted components have the highest conversion efficiency, and the system BER performance is optimal. In addition, it is proved that the proposed scheme can dynamically adjust the frequency of the converted wavelength and realize almost non-distortion.

Keywords: new energy power plants; optical communication; wavelength conversion; high-transparency

0 引言

光通信技术是新电厂通信的重要组成方案, 可实现不同电厂之间、电厂和用户之间以及不同用户之间的大吞吐量、低损耗、低成本的高速传输^[1-2]。目前, 随着新能源技术的迅猛发展, 及电力系统光通信资源调度自动化、新型通信设备大量应用, 使得数据通信资源呈现出一种爆炸式增长态势, 其安全性、可靠性、管理方式等都成为电力通信网管理工作中急需考虑的问题, 并需要优化对新能源电厂光通信并网的管理方式^[3]。波长转换可以有效降低电厂合并网络的传输时延, 并降低信息传递阻塞的可能性; 波长转换还可以实现网络的保护切换, 将信号从故障的信道转移到正常的空闲信道上, 使得通信系统更通畅。

目前业界常用的波长转换技术按照物理机制不同, 可

分为3种: 光-电-光型波长转换技术、光控技术和四波混频技术^[4]。然而已有的波长转换技术都存在着一些问题。对于光-电-光型波长转换技术来说, 须先将输入的光信号转换为电域的数字信号之后再行波长转换, 这会导致输入光波形损伤, 并且存在过程复杂、造价高、透明度低等缺陷^[5]; 光控性波长转换器也存在透明度低和复杂度高的问题, 并且还对用户信号带宽有限制^[6]。利用四波混频方式实现的波长转换技术虽有着较高的透明度, 但其复杂度、造价高, 鲁棒性低^[7]。此外, 在这些波长转换技术中, 一旦相应的器件参数选定之后, 转换波长也就相对固定了, 无法实现灵活可调的波长转换, 也就不能很好地支持电厂通信网络的可重构性。

本文提出了一种新型基于双驱动马赫增德尔(DP-MZM)的波长转换技术, 很好的弥补了目前三类波长转换技术存在的问题, 具有高灵敏度、可重构、低成本等优点。这种新型的波长转换方案可以提供高传输透明度, 根据不同用户的需求, 动态可控地调整转换波的频率以克服通信网络中波长阻塞和昂贵超宽带光电调制器的限制, 同时满足合并网络可灵活重构的要求。此外通过理论分析, 数字仿真和硬件实验给出了波长转换器的最优驱动条件, 以确保波长转换器的最优工作状态。

收稿日期:2018-04-08; **修回日期:**2018-10-09。

基金项目:湖南省科技计划项目经费资助(2016TP1021); 湖南省自然科学基金资助(2018JJ2154)。

作者简介:赵婷(1983-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统通信方向的研究。

通讯作者:谢文武(1979-), 男, 博士, 讲师, 主要从事信号处理方向的研究。

1 基于 DP-MZM 的波长转换方案的实现

基于 DP-MZM 的波长转换方案原理如图 1 所示。该方案进行波长转换过程为, 当一束携带着任意调制格式用户信息的光信号(波长为 λ_0) 入射到由两个 RF 射频信号和两个直流分量构成的驱动条件驱动的 DP-MZM 中, DP-MZM 将用户信号转换为一系列满足贝塞尔函数分布的、频率间隔等于 RF 射频信号频率的光谱, 且每一束光谱携带着相同的用户信息, 具有传输透明度。SDN 通过控制驱动条件, 进而控制 DP-MZM 输出光谱的功率和数量。

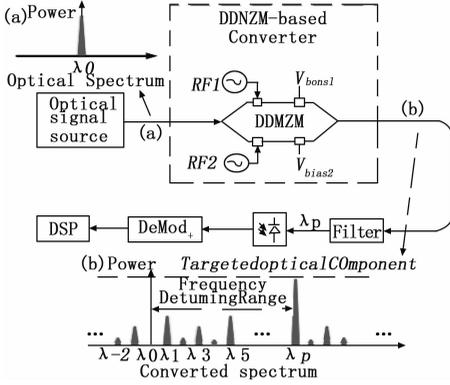


图 1 基于 DP-MZM 的波长转换方案原理图

设选取目标光信号作为转换波, 特定的驱动条件, 可保证这个转换波同时拥有理论上最高的转换效率和频率去谐范围。由于这些驱动条件可以由数字信号处理 (DSP) 集中管理, 这种波长转换器便具有可配置、可扩展的特点, 非常灵活且有弹性。为了得到这个特定的理想驱动条件, 本文首先对 DP-MZM 的理论公式进行了推导。

DSP 驱动使能的波长转换器由图 1 中虚线框图所示。加在 DP-MZM 上的 2 个射频驱动信号分别为 $A_1 \cos(\omega_{rf} + \theta_1)$ 、 $A_2 \cos(\omega_{rf} + \theta_2)$, 2 个直流偏置电压分别为 V_{bias1} 、 V_{bias2} 。设用户信号 $E_{in}(t) = A(t) \cdot e^{j(\omega_c t + \theta_c)}$ 注入到 DP-MZM 中, 利用贝塞尔函数的 Jacobi-Anger 展开式, 结合文献 [8] 和图 1, 假定 DP-MZM 偏置电压为 V_π , DP-MZM 的输出信号为:

$$E_{out}(t) = B(t) \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta_1) e^{j\theta_1^k} + \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta_2) e^{j\theta_2^k} \right) \quad (1)$$

其中: $A(t)$ 是输入光信号的幅度, t_{ff} 是 DP-MZM 的插入损耗, ω_c 和 θ_c 分别是输入光信号的中心角频率和初始相位。 ω_{rf} 和 θ_i ($i = 1, 2$) 分别是射频驱动信号的角频率和相位。 $\Delta\varphi_{up}$ 和 $\Delta\varphi_{down}$ 分别是直流偏置电压 V_{bias1} 和 V_{bias2} 产生的相移, 并且满足 $\Delta\varphi_{up} = \pi V_{bias1}/V_\pi$ 和 $\Delta\varphi_{down} = \pi V_{bias2}/V_\pi$, β_1 、 β_2 分别是 DP-MZM 上下两臂的光调制系数, 并且满足 $\beta_i = \pi A_i/V_\pi$ ($i = 1, 2$), A_i ($i = 1, 2$) 是射频驱动信号的幅度。 $\theta_i^{kp} = \Delta\varphi_{up} + k\pi/2 + k(\omega_{rf}t + \theta_1)$, $\theta_1^{kp} = \Delta\varphi_{down} + k\pi/2 + k(\omega_{rf}t + \theta_2)$, 及 $B(t) = A(t) e^{j(\omega_c t + \theta_c)} \sqrt{t_{ff}}/2$ 。

设第 p 次谐波是选定的目标转换波, 则根据 (1) 结果可知第 p 次谐波的数学表达式为:

$$E_{out-p}(t) = B(t) K_p \cdot e^{j(\omega_c t + \theta_c)} \quad (2)$$

其中: K_p 被定义为:

$$K_p = J_p(\beta_1) e^{j(\Delta\varphi_{up} + p\theta_1)} + J_p(\beta_2) e^{j(\Delta\varphi_{down} + p\theta_2)} \quad (3)$$

由 (3) 可得, K_p 的值直接影响着波长转换器输出信号的第 p 次谐波的幅度值和相位值。且 K_p 的值越大, 则输出信号的第 p 次谐波的幅度值就越大。

此时, 将输出信号的目标波 (第 p 次谐波) $E_{out-p}(t)$ 与输入信号 $E_{in}(t)$ 相比较, 可以得到基于 DP-MZM 的波长转换器的理论转换效率为:

$$\eta_p = \frac{|E_{out-p}(t)|^2}{|E_{in}(t)|^2} = \frac{t_{ff} |K_p|^2}{4} \quad (4)$$

其中 $|K_p|^2$ 可以很容易得到:

$$|K_p|^2 = J_p^2(\beta_1) + J_p^2(\beta_2) + 2J_p(\beta_1)J_p(\beta_2) \cdot \cos(p\theta_1 - p\theta_2 + \Delta\varphi_{up} - \Delta\varphi_{down}) \quad (5)$$

由公式 (1) 和公式 (4) 可得, 波长转换器输出信号的第 p 次谐波的幅度值与其相应的 p 阶贝塞尔函数 $J_p(\beta_i)$ 成正比关系。因此, 为了使得波长转换器输出的目标信号波获得最高的输出功率, 应该使 K_p 取得最大值, 即使公式 (5) 中的 p 阶贝塞尔函数 $J_p(\beta_i)$ ($i = 1, 2$) 都取得最大值, 即:

$$\begin{cases} p\theta_1 - p\theta_2 + \Delta\varphi_{up} - \Delta\varphi_{down} = 2m\pi \\ \beta_1^{pp} = \beta_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中: β_p^{pp} 是使 p 阶贝塞尔函数取得最大值时的相应的光调制系数。

因此, 当波长转换器的输出信号的第 p 次谐波满足公式 (6) 时, $|K_p|^2$ 取得最大值, 此时, 输出信号的第 p 次谐波的功率达到最大, 波长转换器的转换效率也达到理论最高值。

在前面的分析中, 基于 DP-MZM 的波长转换器的输出信号中包含其他谐波分量 (也被叫作寄生波)。波长转换器输出的寄生波中也包括第 0 阶谐波。将公式 (6) 带入公式 (5), 令 $p = 0$, 可以得到第 0 阶谐波 K_0 的表达式如下:

$$K_0 = 2J_0(\beta_{p-pp}) \cos\left(\frac{\Delta\varphi_{up} - \Delta\varphi_{down}}{2}\right) e^{j\frac{\Delta\varphi_{up} - \Delta\varphi_{down}}{2}} \quad (7)$$

从之前的分析可以知道, K_p 的值越大, 则波长转换器输出信号的第 p 次谐波的幅度值越大, 因此, 为了使得第 0 阶谐波最小, 要使 K_0 的值取到最小, 即求 $K_0 = 0$ 的解, 如下式所示。

$$\Delta\varphi_{up} - \Delta\varphi_{down} = \pi + 2m\pi \quad (8)$$

令公式 (4) 中的 $p = k$ (k 代表第 k 阶谐波), 得到 K_k 的表达式, 用于表示除输出目标波和第 0 阶谐波以外的其他寄生波的影响因子, 并结合公式 (8) 将其化简, 即:

$$K_k = 2J_k(\beta_p^{pp}) \sin\left(\frac{k\theta_1 - k\theta_2}{2}\right) \cdot e^{j\left(\frac{\Delta\varphi_{up} - \Delta\varphi_{down}}{2} + k(\omega_{rf}t + \theta_1) - k(\omega_{rf}t + \theta_2)\right)} \quad (9)$$

可以看出, 寄生波可以被分为奇次谐波 ($k = \pm(2n-1)$, n 为整数) 和偶次谐波 ($k = \pm 2n$, n 为整数)。所有偶次谐波可以很容易的消除。

$$\theta_1 - \theta_2 = m\pi \quad (10)$$

综合以上分析, 波长转换器最终输出的光信号可以表示为:

$$E_o = A(t) \sqrt{t_{ff}} \left[\begin{matrix} J_p^{\max}(\beta_p^{opt}) e^{j\theta_{\max}} + \\ \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n/4} \cdot \\ J_{p-2n}(\beta_p^{opt}) e^{j\theta_n} \end{matrix} \right]$$

$$\theta_{\max} = \omega_c t + p\omega_r t + \theta_c + \Psi_p$$

$$\theta_n = \omega_c t + (p - 2n)\omega_r t + \theta_c + \Psi_{(p-2n)} \quad (11)$$

其中: Ψ_p 是第 p 次谐波的相位。

$$\Psi_p = \frac{\Delta\varphi_{up} + \Delta\varphi_{down} + p\pi + p\theta_1 + p\theta_2}{2} \quad (12)$$

此时, 基于 (11) 的输出信号表达式, 将其中目标波 (第 p 次谐波) 与波长转换器的输入信号相比较, 分析计算波长转换器的理论转换效率可得:

$$\eta_p = \frac{|E_{out-p}(t)|^2}{|E_m(t)|^2} = J_p^2(\beta_{p-opt}) t_{ff} \quad (13)$$

对于基于 DD-MZM 的波长转换方案, 等式 (6) 可以保证波长转换器的输出功率达到最高, 也就是得到最高的转换效率, 结合 (8)、(10) 得到 (14), 即 DP-MZM 的波长转换方案的最佳驱动条件。

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{up} - \Delta\varphi_{down} = \pi + 2m\pi \\ \Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \pi + 2m\pi \\ \beta_{p-opt} = \beta_1 = \beta_2 \end{cases} \quad (14)$$

2 波长转换最优驱动条件验证

2.1 仿真条件

基于 DP-MZM 波长转换方案的驱动条件由 2 个射频驱动信号及 2 个直流偏压组成, 均由外部的 DSP 进行控制管理。在发送端, 通过马赫-曾德尔强度调制器 (IM-MZM) 将 10 Gb/s 的 16QAM-OFDM 用户信号调制到 1550 nm 的光上, 然后注入基于 DP-MZM 的波长转换器中。完成波长转换之后, 输出的转换波以及其他残余谐波分量通过光滤波器将目标转换波滤出, 通过光纤传输后到达接收端。在接收端, 光信号通过 PIN 光电二极管进行光电转换, 将光信号转换为电信号, 之后由解调器对用户信号进行解调, 得到的基带信号最终传输给 DSP 模块。

为了验证最优驱动条件的正确性, 通过大量的数字仿真对最优调制条件和随机驱动条件驱动下的波长转换器性能进行了对比验证。转换器的性能主要包括转换器转换效率, BER 以及寄生载波数量。

对于最优驱动条件, β_{p-opt} 分别取 1.84, 4.20, 6.42, 8.58 和 10.71 对应于 1-, 3-, 5-, 7-, 9-阶光谱作为目标转换波的情况。射频信号的相位分别取 $\Delta\theta = \pi$ ($\theta_1 = \pi, \theta_2 = 0$), 直流分量对应的偏置相位 $\Delta\varphi_{up}$ 和 $\Delta\varphi_{down}$ 分别设置为 π 和 0。对于随机驱动条件, 这四个相位条件 $\theta_1, \theta_2, \Delta\varphi_{up}$ 和 $\Delta\varphi_{down}$ 被设置为是四个独立不相关的随机变量。在仿真波长转换器性能时, 例如对一个特定阶光谱的转换效率, 采用 2 000 个完全独立的数字仿真, 每一个仿真中, 四个相位条件完全独立随机从 0 到 2π 范围中取值。

本论文中的仿真工作是在虚拟光学仪器 (VPI) 软件上进行。本文的仿真, 对于一部分参数的设定是基本不变的, 其设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

	参数名称	参数值
DD-MZM	插入损耗	0 dB
	消光比	20 dB
	半波电压 V_π	5 V
输入光信号	信号中心频率	193.1 THz
	线宽	10 MHz
	平均光功率	6 dBm
OFDM 信号参数	循环前缀	12.5%
	子载波数量	64
	上变频频率	30 GHz
驱动条件	射频驱动信号频率 f_{rf}	30 GHz

2.2 波长转换方案的最佳驱动条件验证仿真

为验证基于 DP-MZM 的波长转换器的最佳驱动条件, 仿真对比了在最佳驱动条件下和大量随机驱动条件下基于 DP-MZM 的波长转换器的输出信号的转换效率、频率去谐情况和 BER 情况。

首先仿真分析分别在最佳驱动条件及 2000 组随机驱动条件下, 使用不同阶数谐波作为转换波时仿真得到的波长转换器的转换效率, 如图 2 所示。

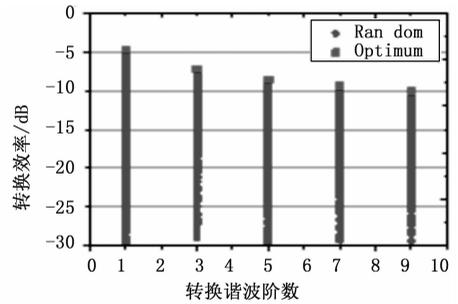


图 2 最佳驱动条件及大量随机驱动条件下的转换效率

图中最上方代表最佳驱动条件, 其余代表随机驱动条件。由图 2 可以看出, 与随机驱动条件下的仿真结果相比较, 对于每一个被选取的谐波阶数 (频率去谐点), 在最佳驱动条件下的仿真结果都能够达到理论上的最高转换效率, 并且这个转换效率值与公式 (4) 得到的值一致。因此验证了在公式 (4) 所描述的最佳驱动条件正确性。

最佳的频率去谐特性可以使波长转换器输出的寄生谐波数量最少, 并且对于给定的射频驱动信号, 可以实现更大的频率去谐范围。因此, 为了分析频率去谐特性, 仿真得到在最佳驱动条件及大量随机驱动条件下波长转换器在每一个频率去谐点输出的谐波数量如图 3 所示。

可以很明显的看出, 在随机驱动条件下, 波长转换器输出的谐波数量大大多于最佳驱动条件下输出的谐波数量。与随机驱动条件的情况相比, 最佳驱动条件的情况下基于 DP-MZM 的波长转换方案最多可以消除 50% 的谐波数量。这是由于如 (11) 所示, 所有的奇数次谐波都会被抑制。因此验证了在公式 (14) 所描述的最佳驱动条件下, 基于 DP-MZM 的波长转换方案能够实现最佳的频率去谐效果。

为了进一步验证基于 DP-MZM 的波长转换器在最佳

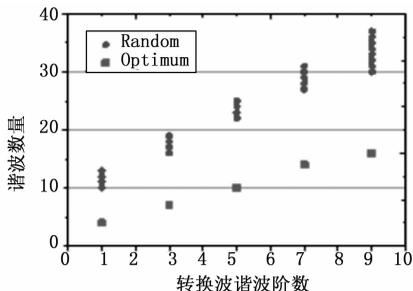


图 3 最佳 VS 随机驱动条件下的输出谐波数量

驱动条件下的性能，仿真以输出目标波为第 5 阶谐波的情况为例，设定输入信号的光信噪比 (OSNR)，对波长转换器输出信号的误码率 (BER) 性能进行仿真分析，仿真同样包含最佳驱动条件和随机驱动条件两种情况，得到仿真结果如图 4 所示。

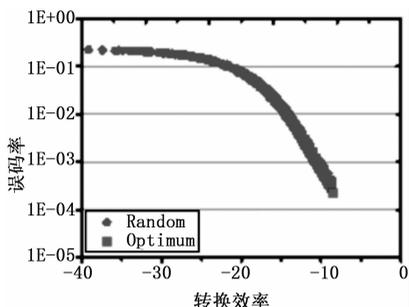


图 4 给定输入信号的 OSNR 时输出转换波的 BRE

可以看出，当满足最佳驱动条件时，基于 DP-MZM 的波长转换方案能同时实现最高的转换效率以及最优的 BER 性能。这是因为，在仿真系统中固定了输入信号的光信噪比 (OSNR)，转换效率越高时，输出转换波的光信噪比 (OSNR) 会越大，则 BER 也会越好。最佳驱动条件能够提供理论上最高的转换效率，因此能得到最好的系统 BER 性能。

本节验证了基于 DD-MZM 的波长转换方案的最佳驱动条件与理论推导一致，在最佳驱动条件下，基于 DD-MZM 的波长转换方案能够达到理论上最高的转换效率，能够实现最佳的频率去谐效果，并且能同时实现最高的转换效率以及最优的 BER 性能。

3 系统实验及结果分析

为了验证 DP-MZM 转换波的可行性和实用性，基于图 1 搭建了相关的实验系统。由 RIO ORION™ Laser Module 提供一束中心波长为 1550.118 nm 功率为 13 dBm 光源，AWG (Tektronix AWG 7122C) 发送的 10 Gb/s 16QAM-OFDM 信号经强度调制器调制到光上。光 OFDM 通过 EDFA (LTRAN™ LOA3000) 和可控衰减器 (FVA 600) 注入到 22dB ER 和 8dB 插入损耗的 DPMZM (Fujitsu 7939EK) 中。一个 12.5 GHz 的射频信号通过信号发生器 (Anritsu MG3697C) 产生，通过 6~12 GHz 的 30 dBm 功率放大器 (TRANSCOM TA060-120-35-30) 和一分二的移相器分成相位相差 180° 的两路驱动信号分别加载到 DP-MZM 上。

移相器可以保证两路射频信号满足最优驱动条件即振幅相同，频率相同且相位相差 180°。DP-MZM 转换波通过光滤波器 (OTF-350) 选取对应的转换波，然后通过 12 GHz 光接收机 (New Focus 1544) 转成电接收信号。电信号通过示波器探测并最终送入电脑做离线处理。

对于一个发射功率为 7.9 dBm 的 10Gb/s OOFDM 信号，图 5 研究了转换器引起的功率损耗，其中 1-，5-阶的转换波分别满足最优驱动条件，分析了对应的 BER 性能和激光器发射光功率之间的关系。如图 5 所示，对于 1.0×10^{-3} 的 FEC limit，相对于没有使用波长转换器的 BER 曲线，1-和 5-阶转换波造成的功率损耗近似于 12.5 dB 和 16.1 dB。值得指出的是，这两者的差值 3.6 dB 近似等于两者的转换效率差 3.8 dB。这说明了 DP-MZM 造成的功率损耗主要是来自于不同转换波的转换效率差值。

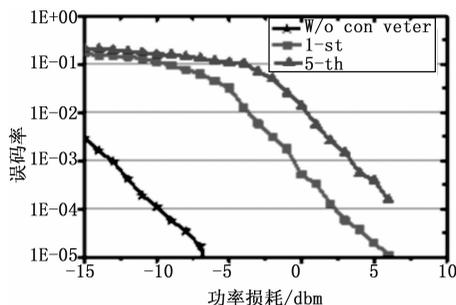


图 5 1-与 5-阶的 BERs 和光发射功率关系

对于转换器线性转换的研究通过图 6 实验验证，其中 1-和 5-阶转换波解调的 OFDM 信号和没有使用转换器的 OFDM 信号做了归一化对比。这些信号近似重合的，说明了转换器对信号的处理是线性和几乎对波形无损的。

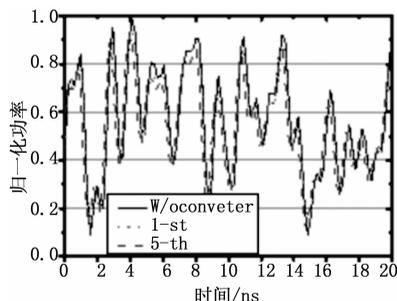


图 6 1-，5-阶转换波的信号波形和没有经过转换器的归一化 OFDM 时域波形。

4 总结

为了满足新能源电厂的光通信问题，本文提出了一种基于 DP-MZM 的波长转换方案。此方案能够克服传统波长转换器的缺点，拥有高传输透明度，实现无波形失真的波长转换，并且可以利用 SDN 实现用户资源的动态可控以及实时配置。仿真分析表明：此波长转换方案的最高转换效率可达到 -4.703 dB，消除 50% 的谐波数量，另外最佳驱动条件可以保证转换器有最高转换效率及最低误码率；在传输性能的仿真中，证明了波长转换器对输入信号功率具有强鲁棒性，可以实现波形无失真的波长转换。在实验部

(下转第 219 页)