

一种基于双边带调制的任意波形相干纳秒脉冲生成方案

潘一锋, 周庆红

西南科技大学数理学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2025年2月22日; 录用日期: 2025年4月11日; 发布日期: 2025年4月21日

摘要

纳秒脉冲可以应用于激光加工、激光雷达和光谱分析等不同的场景。通过传统的纳秒脉冲生成方案(如调Q激光和斩波器)得到的纳秒脉冲不具有相干性, 且因为光栅工艺的限制, 纳秒脉冲不能被整形为任意的波形。这限制了纳秒脉冲在需要精确控制的场景中的应用。为此, 我们提出了一种通过并行马赫曾德尔调制器实现基于双边带调制的纳秒脉冲生成方案。这种纳秒脉冲具有相干性, 且具有任意波形。我们的仿真结果展示了不同周期, 不同波形的相干纳秒脉冲。

关键词

激光调制, 双边带调制, 相干纳秒脉冲

An Arbitrary Waveform Coherent Nanosecond Pulse Generation Scheme Based on Double-Sideband Modulation

Yifeng Pan, Qinhong Zhou

School of Mathematics and Physics, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

Received: Feb. 22nd, 2025; accepted: Apr. 11th, 2025; published: Apr. 21st, 2025

Abstract

Nanosecond pulses can be applied in various scenarios such as laser processing, LiDAR, and spectral analysis. Nanosecond pulses generated by traditional methods (such as Q-switched lasers and choppers) lack coherence and, due to limitations in grating technology, cannot be shaped into arbitrary waveforms. This restricts the application of nanosecond pulses in scenarios that require precise control. To address this, we propose a nanosecond pulse generation scheme based on double-sideband modulation, implemented through a parallel Mach-Zehnder modulator. These nanosecond

pulses are coherent and can have arbitrary waveforms. Our simulation results demonstrate coherent nanosecond pulses with various waveforms.

Keywords

Laser Modulation, Double-Sideband Modulation, Coherent Nanosecond Pulse

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

纳秒脉冲广泛应用于激光加工[1]、激光雷达[2]和极紫外光源[3]等场景中。由传统调Q技术或者斩波器产生的纳秒脉冲通常较宽的频谱。因此,脉冲序列内的不同脉冲之间相位不恒定,即是不具有相干性。同时,因为光栅刻蚀工艺的限制,光栅的分辨率不足以完成纳秒时间尺度的脉冲整形[4]。这限制了纳秒脉冲在需要精确控制的场景中的应用。

边带生成是高速信号与电光调制器相互作用下的非线性效应[5]。这种效应已经被用于单边带调制[6],双边带调制[7],抑制载波双边带调制[7]。双边带调制是一种在载波两侧产生对称边带的边带生成技术[8]。由于调制具有线性特性,调制信号的线宽将与光源的线宽保持一致[7]。通过频率稳定技术,光源线宽可以减小到几千赫兹。双边带调制可以产生具有频率梳结构的脉冲[9],且梳齿之间的比例可以设置。因此双边带调制有望产生任意波形的相干纳秒脉冲。

本文提出了一个通过并列排布的马赫曾德尔调制器(MZM) [10]实现基于双边带调制的任意波形相干纳秒脉冲方案。窄线宽单频激光器通过 Pound-Drever-Hall (PDH)技术与光学腔锁腔之后,通过并列排布的 MZM 来产生脉冲。通过调节加载在不同 MZM 上的射频信号的幅度和频率以及直流偏置的大小,来得到不同周期,波形,占空比的纳秒脉冲。我们在文中提出了该脉冲生成方案的理论模型,用仿真验证了理论模型的可行性。我们的仿真结果展示了不同周期、不同占空比的相干纳秒脉冲。

2. 任意波形相干纳秒脉冲生成的流程图与理论模型

2.1. 方案流程图

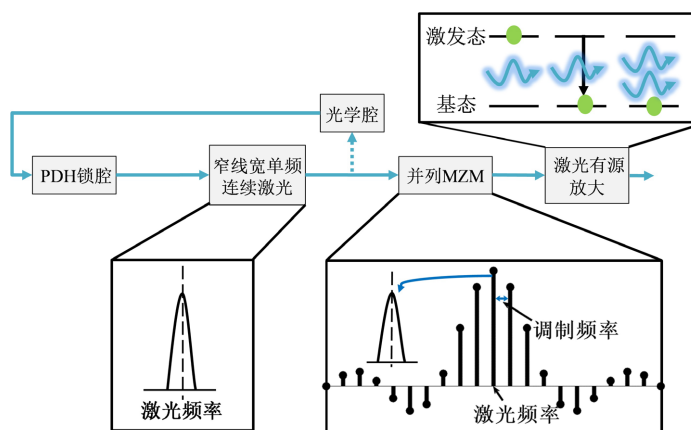


Figure 1. Schematic diagram
图 1. 方案流程图

图 1 为该方案的流程图。单频激光器通过 PDH 锁腔技术与一个光学腔进行相位锁定, 将频率稳定到一个腔模上。输出的窄线宽单频激光注入一系列并行排列的 MZM 内进行双边带调制。从频域上看, 双边带调制将会在激光载波频率两侧产生了一系列对称的间隔为调制频率的边带。加载在 MZM 上的射频信号会改变边带之间的频率差, 直流信号会改变边带之间的相位差。因为调制的线性特征, 谱线的线宽将与激光器的线宽保持一致。为补偿调制过程中的光强损失, 产生脉冲将通过有源放大的方法增强到应用所需的功率。该过程不会影响脉冲的波形和相干性。

2.2. 理论模型

一个包络为 $f(t)$ 的光场可以表示为

$$E(t) = f(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

其中 ω_0 为光场的频率, φ_0 为光场的初始相位。若 $f(t)$ 具有相干性, 即是 $f(t)$ 为周期函数。则 $f(t)$ 可以表示为一系列傅里叶级数的和。

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F(\omega) \cos(n\omega t) + c \quad (2)$$

其中 $F(\omega)$ 为傅里叶级数, c 为常数。利用三角恒等式 $\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2}(\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta))$, 公式(1)可以改写为

$$\begin{aligned} E(t) &= cf(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \sum_{n=1}^{\infty} F(\omega) \cos(n\omega t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \\ &= cf(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \\ &\quad + \frac{1}{2} F(\omega) [\cos(n\omega t + \omega_0 t + \varphi_0) + \cos(-n\omega t + \omega_0 t + \varphi_0)] \end{aligned} \quad (3)$$

可以看出各种波形的相干纳秒脉冲的频谱是一系列梳齿, 如图 2 为矩形相干脉冲的频谱。通过并列放置的 MZM 进行双边带调制可以高效构建这种频谱, 如图 3 所示。每个 MZM 都由直流信号和射频信号驱动, 且他们都在推挽模式下运行。在此模式下, 每个 MZM 内的 EOM 上的射频信号的信号幅度相反。因此第 i 个 MZM 上的两个 EOM 产生的相移分别为 $A_i \sin(\omega_{mi} + \varphi_i) + B_i$ 和为 $A_i \sin(\omega_{mi} + \varphi_i) + B_i$ 。其中 A_i 为调制指数, ω_{mi} 为调制频率, φ_i 为初始相位, B_i 为直流分量带来的相移。在理想情况下, 调制后将会得到以下光场

$$E_{out} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \exp \left[i \left(\omega_0 t + \varphi_0 + A_i \sin(\omega_{mi} + \varphi_i) + B_i \right) \right] + \exp \left[i \left(\omega_0 t + \varphi_0 - A_i \sin(\omega_{mi} + \varphi_i) + B_i \right) \right] \right\} \quad (4)$$

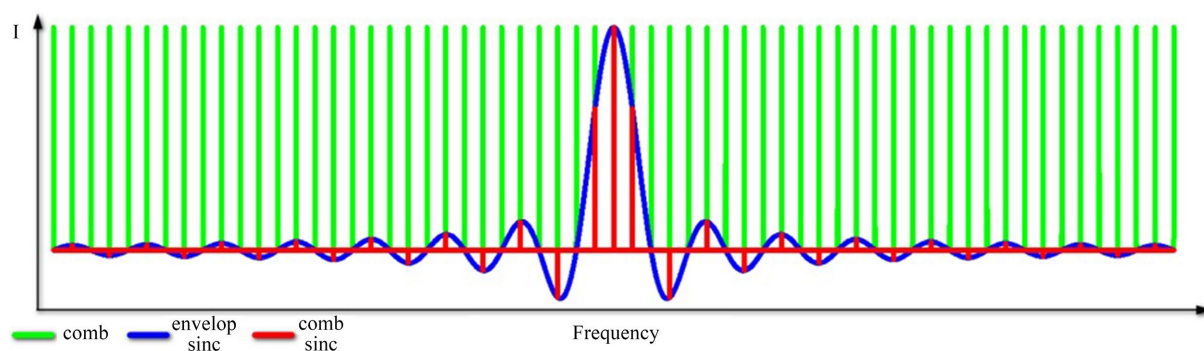


Figure 2. Spectrum of square waves

图 2. 方波频谱图

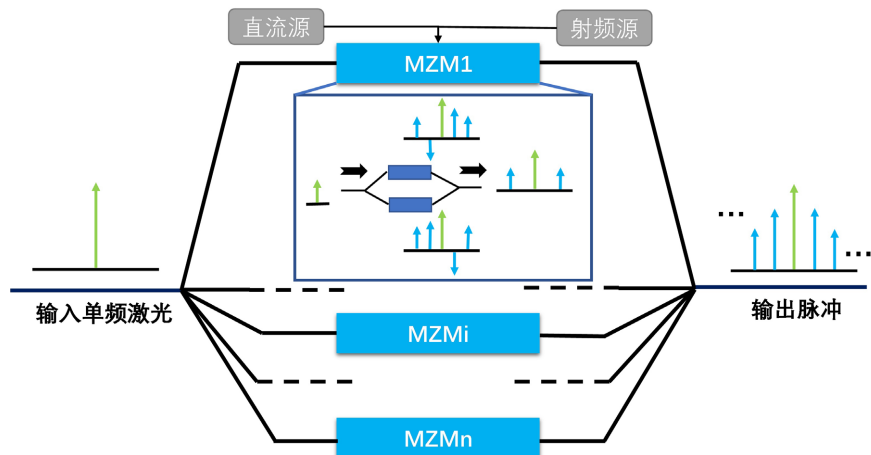


Figure 3. Double-sideband modulation diagram based on parallel MZM

图 3. 基于并列 MZM 的双边带调制示意图

可以通过设置时间轴使得 $\varphi_0 = 0$, 并将上式用第一类贝塞尔级数展开。在实际情况下, 调制指数不会超过 2。因此二阶以上的第一类贝塞尔函数值比较小, 可以忽略, 第一类贝塞尔函数数值如图 4 所示。则上式可以表示为

$$\begin{aligned}
 E_{out} &= \frac{1}{n} \exp[i(\omega_0 t + \varphi)] \sum_{i=1}^n \left\{ J_{-2}(A_i) \exp[-i(2\omega_{mi} t + B_i)] \right. \\
 &\quad \left. + J_0(A_i) \exp(B_i) + J_2(A_i) \exp[i(2\omega_{mi} t + B_i)] \right\} \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ J_{-2}(A_i) \exp[i((\omega_0 t - 2\omega_{mi})t + \varphi + B_i)] \right. \\
 &\quad \left. + J_0(A_i) \exp[i(\omega_0 t + \varphi + B_i)] \right. \\
 &\quad \left. + J_2(A_i) \exp[i((\omega_0 t + 2\omega_{mi})t + \varphi + B_i)] \right\}
 \end{aligned} \quad (5)$$

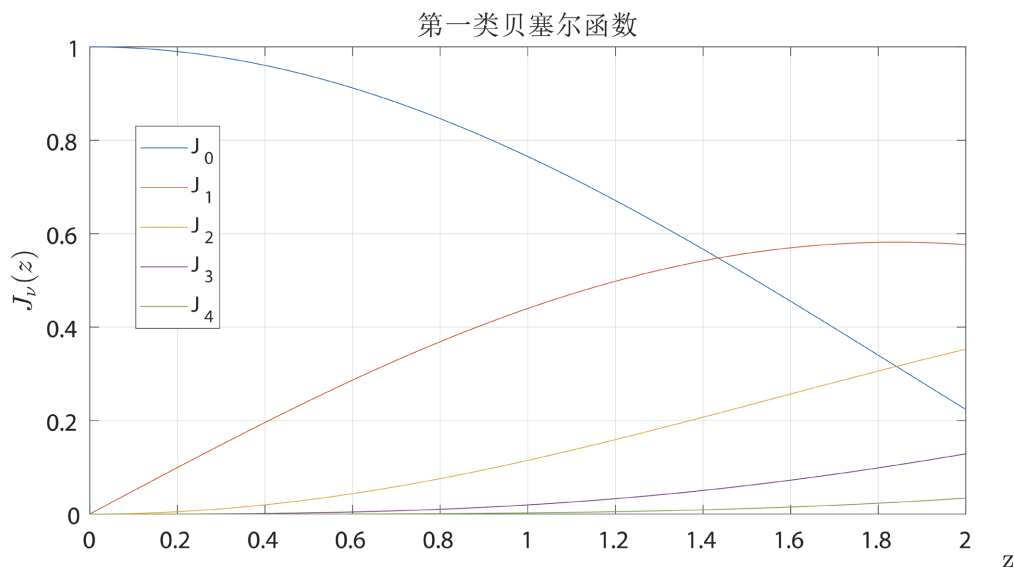


Figure 4. Bessel functions of the first kind

图 4. 第一类贝塞尔函数

我们通过分析公式(3)和公式(5)可知以下几点。第一, 载波频率一侧的边带数量与 MZM 的数量保持一致, 并行的 MZM 数量越多则频谱构建越完整。第二, 调制频率 ω_m 与所需构建的谱线之间的频率差一致。在纳秒时间尺度下, 调制频率一般在兆赫量级。第三, 边带的幅度由调制指数决定。

3. 结果与讨论

我们设置公式(5)的参数来进行仿真。我们模拟通过 20 通道 MZM 来得到波长为 780 nm 线宽为 2.39 KHz 的周期不同的相干纳秒方波。通过表 1 所示各 MZM 调制指数的设置, 我们利用构建如图所示的频谱。再通过分别设置周期分别为 5 ns, 60 ns, 300 ns 的周期频率为基频的奇次谐波作为调制频率, 可以得到边带间隔不同的频谱。不同的频谱傅里叶变换后对应的方波脉冲如图。从仿真结果可以看出, 调制得到了周期分别为 5 ns, 60 ns, 300 ns 的方波序列。

Table 1. Modulation index Settings for each MZM

表 1. 各 MZM 的调制指数设置

MZMi	MZM1	MZM2	MZM3	MZM4	MZM5
调制指数	2.00	1.01	0.77	0.65	0.57
MZMi	MZM6	MZM7	MZM8	MZM9	MZM10
调制指数	0.51	0.47	0.44	0.42	0.39
MZMi	MZM11	MZM12	MZM13	MZM14	MZM15
调制指数	0.37	0.35	0.34	0.33	0.32
MZMi	MZM16	MZM17	MZM18	MZM19	MZM20
调制指数	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26

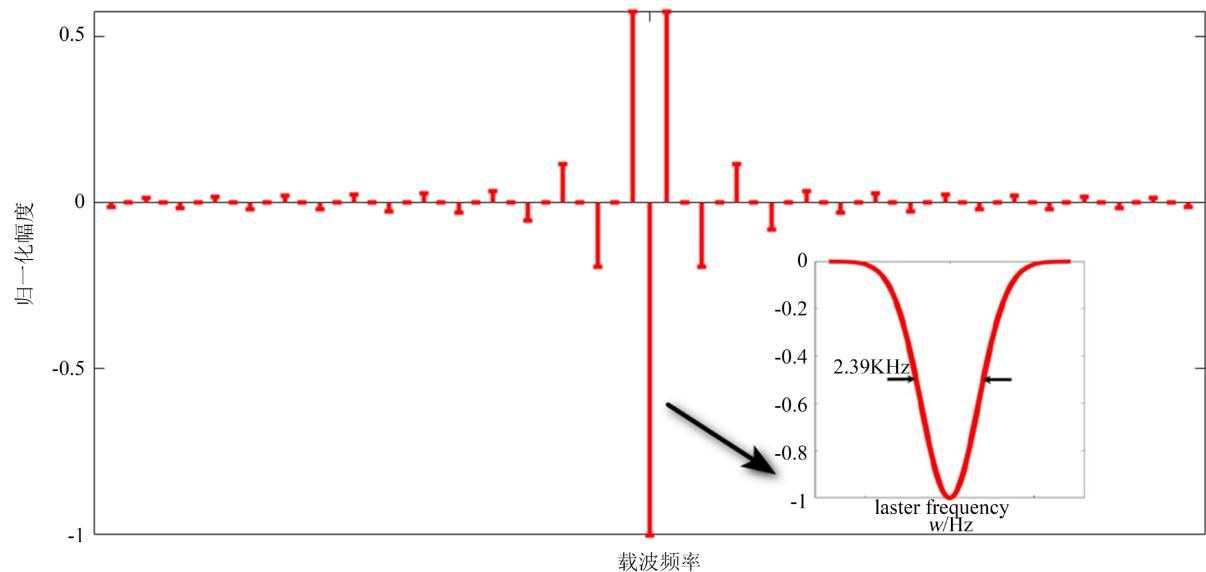


Figure 5. Square wave spectrum obtained by 40-channel parallel MZM modulation

图 5. 通过四十通道的并列 MZM 调制得到的方波频谱

我们还模拟了通过 2 通道 MZM 得到波长为 780 nm 线宽 2.39 KHz 周期为 100 ns 的不同波形的脉冲序列。通过设置各波形的所需谐波频率与表 2 所示各 MZM 调制指数, 我们构建了图 7(a), 图 7(b), 图 7(c), 图 7(d)以及这些频谱傅里叶变换后的方波, 三角脉冲, 半波余弦脉冲, 全波余弦脉冲。

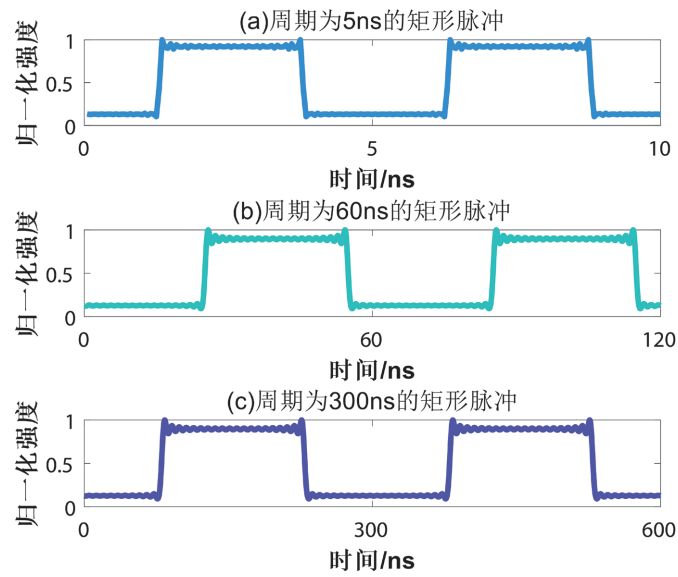


Figure 6. Square wave pulse with period of 5 ns, 60 ns, 300 ns
图 6. 周期为 5 ns、60 ns、300 ns 的方波脉冲

Table 2. The modulation index of each MZM when triangle pulse, half-wave cosine pulse and full-wave cosine pulse are generated

表 2. 产生三角脉冲、半波余弦脉冲和全波余弦脉冲时各 MZM 的调制指数

	三角脉冲	半波余弦脉冲	全波余弦脉冲
MZM1	2	2	2
MZM2	0.57	0.77	0.77

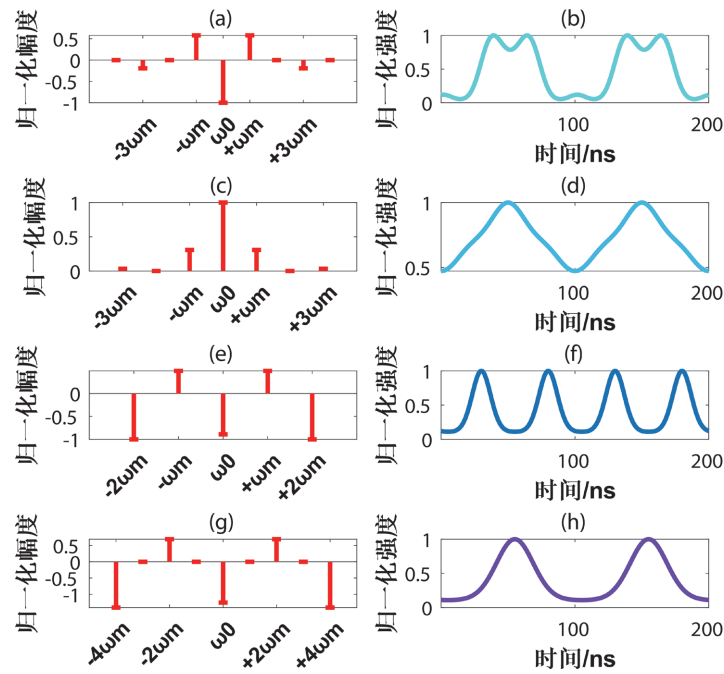


Figure 7. The spectrum and corresponding waveforms of 100 ns triangular pulse, half-wave cosine pulse and full-wave cosine pulse

图 7. 100 ns 的三角脉冲、半波余弦脉冲和全波余弦脉冲频谱以及对应波形

从图 5~7 看出, 这种基于并行 MZM 双边带调制产生了不同周期, 任意波形的纳秒脉冲序列。这些脉冲序列都具有梳齿状的频谱, 因此他们都是相干的。其中有几个问题值得注意。第一, 对比图 6 和图 7(b) 可以看出 MZM 的通道越多, 波形越接近理想波形。但是通道的增多意味这实验难度的提高。因此在实际操作时应该权衡通道数量与波形的对理想波形的接近程度。第二, 脉冲之间的间隔强度并不为 0。这是因为频谱构建不完整。单频激光经过调制后的载波分量由 0 阶贝塞尔函数决定, 载波分量决定波形的在强度轴上的位置。在 2 阶贝塞尔函数满足波形对应频谱比例关系的同时, 大部分情况下 0 阶贝塞尔函数不能满足波形对应频谱比例关系。尤其是如图 7(c), 图 7(d) 所示的三角脉冲。它的边带都具有相同的相位, 因此会出现远大于频谱比例关系的载波分量。而如方波, 半波余弦脉冲, 他们有的频谱中同时有同相和反相的边带, 因此他们的载波分量会比较接近波形对应频谱比例关系。

4. 结论

我们提出了一种通过并列 MZM 的双边带调制来生成任意波形的相干纳秒脉冲的方法。基于我们提出的理论模型, 我们仿真了周期为 5 ns, 60 ns, 300 ns 的相干方波脉冲和周期 100 ns 的方波脉冲, 三角波脉冲, 半波余弦脉冲, 全波余弦脉冲的产生。仿真结果表明在波形对应的频谱同时具有同相和反相分量的情况下, 产生的波形接近理想波形。这种方法可以产生具有窄线宽的相干纳秒脉冲, 且这为需要纳秒脉冲的精确控制的场景提供了一种新的方案。

基金项目

本文由中国国家自然科学基金会支持, 项目编号为 61405168。

参考文献

- [1] Hendow, S.T. and Shakir, S.A. (2010) Structuring Materials with Nanosecond Laser Pulses. *Optics Express*, **18**, Article ID: 10188. <https://doi.org/10.1364/oe.18.010188>
- [2] Abramov, E., Evzelman, M. and Peretz, M.M. (2020) Low-voltage Sub-Nanosecond Pulsed Current Driver IC for High-Speed LIDAR Applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, **8**, 3001-3013. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2019.2932143>
- [3] Deng, X., Chao, A., Feikes, J., Hoehl, A., Huang, W., Klein, R., et al. (2021) Experimental Demonstration of the Mechanism of Steady-State Microbunching. *Nature*, **590**, 576-579. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03203-0>
- [4] Weiner, A.M. (2011) Ultrafast Optical Pulse Shaping: A Tutorial Review. *Optics Communications*, **284**, 3669-3692. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.03.084>
- [5] Kawanishi, T., Sakamoto, T. and Izutsu, M. (2007) High-Speed Control of Lightwave Amplitude, Phase, and Frequency by Use of Electrooptic Effect. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **13**, 79-91. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2006.889044>
- [6] Izutsu, M., Shikama, S. and Sueta, T. (1981) Integrated Optical SSB Modulator/frequency Shifter. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **17**, 2225-2227. <https://doi.org/10.1109/jqe.1981.1070678>
- [7] Kawanishi, T. (2022) *Electro-Optic Modulation for Photonic Networks*. Springer International Publishing.
- [8] Qing, T., Xue, M., Huang, M. and Pan, S. (2014) Measurement of Optical Magnitude Response Based on Double-Sideband Modulation. *Optics Letters*, **39**, 6174-6176. <https://doi.org/10.1364/ol.39.006174>
- [9] Sakamoto, T. and Chiba, A. (2017) Multiple-Frequency-Spaced Flat Optical Comb Generation Using a Multiple-Parallel Phase Modulator. *Optics Letters*, **42**, 4462-4465. <https://doi.org/10.1364/ol.42.004462>
- [10] Kawanishi, T. (2011) Parallel Mach-Zehnder Modulators for Quadrature Amplitude Modulation. *IEICE Electronics Express*, **8**, 1678-1688. <https://doi.org/10.1587/elex.8.1678>