光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022112902

基于微波光子学的光载超宽带信号产生和传输技术

王子健[1]，都　聪[2]，董　玮[1*]

（1. 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室，长春 130012；
2. 中水东北勘测设计研究有限责任公司，长春 130012）

摘　要： 光载超宽带技术因兼具超宽带信号大带宽、传输速率高等优点和光纤传输的远距离传输、损耗小等优势而在近年来备受关注。文章提出一种基于微波光子技术产生超宽带(UWB)信号的系统，该方案基于非线性 PM-IM 转换，产生一阶超宽带信号，然后又用平衡光电探测器(BPD)和光延迟线构建延迟线滤波器对其进行一阶差分，产生了符合美国联邦通信委员会(FCC)掩膜要求的二阶超宽带信号。系统最终产生的二阶超宽带信号的频谱具有大约 5.4 GHz 的中心频率和 4.3 GHz 的 10 dB 带宽。另外，还提出了一种基于直接序列-二进制相移键控调制(DS-BPSK)，并使用卷积编码进行信道编码，然后使用啁啾布拉格光栅对信号进行色散补偿的信号处理技术。通过 Opti-system 软件进行仿真验证，在前向纠错门限为 3.8×10^{-3} 时，接收机灵敏度提升了约 5.5 dBm，有效降低了误码率，提升了光载超宽带系统的传输性能。

关键词： 微波光子技术；超宽带信号产生；DS-BPSK；误码率

中图分类号： TN925　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0098－05

Microwave Photonics-based Generation and Transmission Technology of Ultra-broadband Signal over Fiber

WANG Zijian[1], DU Cong[2], DONG Wei[1]

（1. State Key Lab. of Integrated Optoelectron., College of Electronic Science & Engin., Jilin University, Changchun 130012, CHN;
2. China Water Northeastern Investigation, Design and Research Co. Ltd., Changchun 130012, CHN）

Abstract: Ultra-broadband (UWB) over fiber technology has attracted much attention in recent years because of the advantages of large bandwidth and high transmission rate of UWB signals and the advantages of long-distance transmission and low loss of optical fiber transmission. A system for generating UWB signal based on microwave photonic technology was proposed, which was based on non-linear PM-IM conversion to generate monocycle signal. Then the first-order difference was performed on the signal by using a balanced photodetector (BPD) and an optical delay line to build a delay line filter, producing a doublet signal that met FCC mask requirements. The doublet UWB signal has a center frequency of 5.4 GHz and a 10 dB bandwidth of 4.3 GHz. A signal processing technique based on DS-BPSK was also proposed, with channel coding using convolutional coding, followed by chirped Bragg gratings for dispersion compensation of the signal. Through the simulation by Opti-system software, when the FEC threshold is 3.8×10^{-3}, the sensitivity of the receiver is increased by 5.5 dBm, effectively reducing the bit error rate and improving the transmission performance of the system of ultra-wideband over fiber.

Key words: microwave photonics; UWB signal generation; DS-BPSK; bit error rate

收稿日期：2022－11－29.
基金项目：国家自然科学基金项目(61875070)；吉林省科技发展计划项目(20180201032GX).
* **通信作者：**董　玮　**E-mail：**dongw@jlu.edu.cn

0　引言

超宽带技术虽然具有大带宽、高传输速率等优点，却面临传输距离非常小这一难题，使用光纤等材料来提高传输距离的光载超宽带技术应运而生[1-3]。本文采用基于微波光子学的方法产生超宽带信号。

目前应用光学方法产生超宽带信号的方法主要有基于高斯脉冲的一阶或者二阶微分产生超宽带信号和基于高斯脉冲的一阶或者二阶差分产生超宽带信号。微分方法主要基于相位调制到强度调制(PM-IM)的转换实现，相位调制可以由相位调制器或偏振调制器将高斯脉冲调制到连续波激光上[4-7]，也可以使用非零色散位移光纤将泵浦光的强度变化转换为探测光的相位变化[8]。差分方法可以利用微波光子延时线滤波器来实现，如使用平衡光电探测器和偏振调制器组成延迟线滤波器对高斯脉冲实现差分，产生一阶超宽带信号和二阶超宽带信号，通过半导体光放大器交叉增益调制、交叉相位调制来产生负系数，还有通过偏振调制器产生负系数[9-12]。

本文使用相位调制器和带通滤波器构成一个高通微波光子滤波器，通过相位调制到强度调制转换，对高斯脉冲实现一阶微分。构建具有系数[1，－1]的二抽头微波光子延时线滤波器对一阶超宽带信号进行差分产生二阶超宽带脉冲。最终产生的二阶超宽带信号的持续时间接近 240 ps，频谱具有大约 5.4 GHz 的中心频率和 4.3 GHz 的 10 dB 带宽，相对带宽为 106.2%。为了进一步提高通信的传输性能、增强抗干扰的能力，在光载超宽带系统中应用多脉冲调制技术、色散补偿技术和编码解码技术。通过测试，该系统能够有效降低光载超宽带系统的误码率。

1　微波光子超宽带信号发生器

1.1　系统结构

图 1 为系统结构图，系统包括连续波激光器(CW Laser)、相位调制器(PM)、光带通滤波器(OBPF)、掺铒光纤放大器(EDFA)、位序列产生器(BSG)、高斯脉冲产生器(GPG)，两个光耦合器(Coupler)、两个光电探测器(PD1 和 PD2)、可调光延迟线(ODL)组成了一个二抽头延迟线滤波器。PD1 和 PD2 输出方向相反，构成了延迟线滤波器的系数[1，－1]。

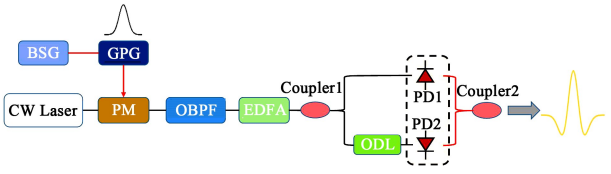


图 1　微波光子超宽带信号发生器结构图

1.2　理论分析

图 2 是一个典型的光学带通滤波器的透射谱。在小信号调制模式下，被射频信号相位调制的归一化光场可以表示为

$$E(t)=J_0(\beta)\cos(\omega_c t)+J_1(\beta)\cos\left[(\omega_c+\omega_m)t+\frac{\pi}{2}\right]-J_1(\beta)\cos\left[(\omega_c+\omega_m)t-\frac{\pi}{2}\right] \quad (1)$$

式中，β 为相位调制指数，ω_c 为光载波的角频率，ω_m 为调制角频率。J_0 和 J_1 是第一类零阶和一阶贝塞尔函数。

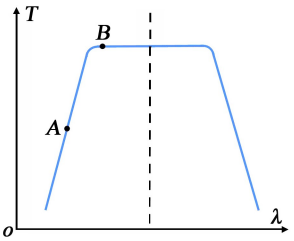
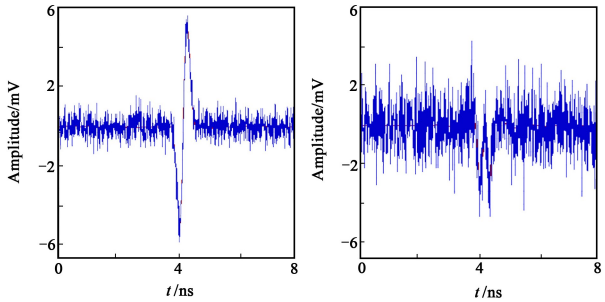


图 2　光学带通滤波器的透射谱

在光学带通滤波器 OBPF 的后面加一个光电探测器 PD，检测到的相位调制信号只会产生直流分量。这是因为载波和上边带之间的差被载波和下边带之间的反相差正好抵消了。因此，对于相位调制光信号，只有当相位调制信号的一个边带被部分或全部抑制时，才能恢复微波信号。将带通滤波器的边缘斜率设置为 5 dB/GHz，当光载波的中心波长位于线性斜率，即 A 点时，会由 PM-IM 转换产生高斯一阶脉冲信号，如图 3(a)所示。而当光载波的中心波长位于非线性斜率的 B 点时，无法产生一阶脉冲信号，如图 3(b)。



(a) A 点　　(b) B 点

图 3　光载波频率分别位于图 2 中 A 点和 B 点时 PD 检测到的时域信号

1.3 仿真验证及结果分析

使用 Opti-system 软件对上面提出的方案进行仿真验证，根据图 1 的系统结构进行仿真，仿真图如图 4 所示。

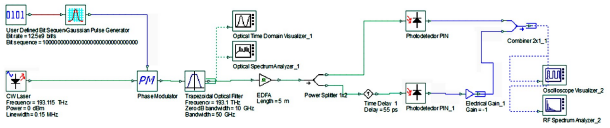
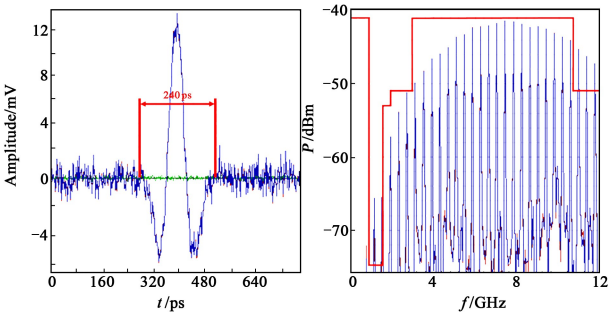


图 4 二阶超宽带信号发生器的仿真原理图

采用线宽为 0.15 MHz 的可调谐激光作为光源。激光器发出的光信号送入相位调制器中，该相位调制器由高斯脉冲产生器发出的高斯脉冲序列所驱动。光载波的中心频率设置为 193.115 THz，位于带通滤波器的左侧线性斜率处（*A* 点）。基于 PM-IM 转换实现一阶微分，再经过延迟线滤波器被差分，在示波器和频谱仪处观测得到二阶脉冲信号。

二阶脉冲信号的时域波形和频谱如图 5 所示。由图 5(a)可看出，二阶脉冲信号的持续时间接近 240 ps。图 5(b)显示了二阶脉冲信号的频谱，频谱具有大约 8.1 GHz 的中心频率和 8.8 GHz 的 10 dB 带宽，相对带宽为 106.2%，并且满足美国联邦通信委员会(FCC)的掩膜要求。

在滤波器的右侧加一个光电探测器 PD 和频谱仪，通过观测得到一阶超宽带信号的频谱，如图 6 所示。通过对比，可以明显地看出二阶超宽带信号的频谱相对于一阶超宽带信号在低频部分得到抑制，与 FCC 掩膜的贴合程度更好。



(a) 时域波形 (b) 频谱

图 5 二阶超宽带信号的时域波形和频谱

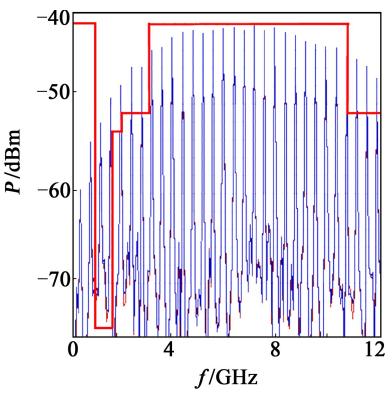
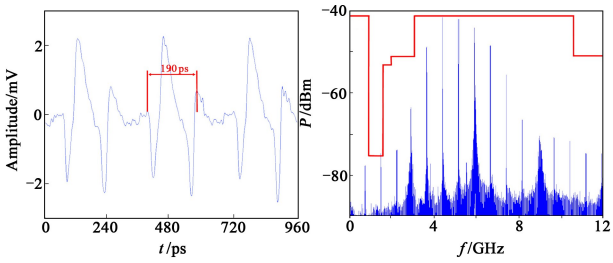


图 6 一阶超宽带信号的频谱

1.4 实验验证及结果分析

实验系统按照图 1 中的结构设置，使用任意波形发生器(M9502A)发出一串高斯脉冲序列(每 16 位一个 1)，输入到相位调制器(MPZ-LN-40)中，令激光器(TSL-550)输出一个中心波长为 1 550 nm 的光载波，调节激光源的中心波长，使其位于带通滤波器(BVF-300CL)的左侧线性斜率处(A 点)，基于 PM-IM 转换获得一阶脉冲。再经过平衡光电放大器(KG-BPR-20G-A-FC)和光延迟线组成的二抽头延迟线滤波器，产生二阶超宽带信号。

使用示波器和频谱仪对输出信号进行检测，二阶超宽带信号的波形和频谱如图 7 所示。由图 7(a)可看出，二阶脉冲信号的持续时间接近 190 ps。图 7(b)显示了二阶脉冲信号的频谱，频谱具有大约 5.4 GHz 的中心频率和 4.3 GHz 的 10 dB 带宽，并且满足 FCC 的掩膜要求。该系统能够以较为简单的结构和较低的成本，产生对 FCC 掩膜贴合度较好的超宽带信号。



(a) 时域波形 (b) 频谱

图 7 二阶超宽带信号的时域波形和频谱

2 超宽带信号传输技术研究

超宽带脉冲信号需要经过一定的处理之后才能够进行发射，而超宽带的调制技术是影响超宽带无线通信系统性能指标的关键因素之一。单脉冲调制容易出现误码率高的情况，因此，为了提高抗干扰性能，可以采用多脉冲调制技术。二相调制能抑制强烈谱线，减少对其他通信系统的干扰[13]，本文采用二相调制，即直接序列扩谱(DS-SS)。在超宽带通信系统中直接序列扩谱技术和 BPSK 调制技术的配合采用较多，这是因为相比较于 TH-PPM 技术，直接序列一二进制相移键控调制(DS-BPSK)具有系统通信速率高、抗干扰能力强等优点[14-15]。本文提

出了一种超宽带信号传输性能优化技术，经过 Opti-system 软件进行仿真验证，本系统能够有效降低误码率，进一步提升光载超宽带传输系统的性能。

2.1　系统结构

系统结构如图 8 所示，任意波形发生器（AWG）发出的脉冲序列，经过卷积编码后，使用 DS-BPSK 方式进行调制。将调制后的脉冲序列接入到相位调制器中，产生具有上述序列的二阶超宽带信号。再将二阶超宽带信号序列进行解调和解码，与 AWG 发出的序列进行比对。同时在光纤链路后端加入一个啁啾布拉格光栅（CFBG）对光纤链路中的信号损伤进行色散补偿。

在高速率传输和远距离通信中，补偿和缓解光纤链路中存在的信号损伤，逐渐成为提升光纤通信系统性能的关键，其中色散又是使信号损伤的重要原因。线性啁啾光纤光栅根据栅格周期与反射波长之间的关系，能产生很大的反射带宽和稳定的色散，因此可应用于波分复用通信系统的色散补偿。

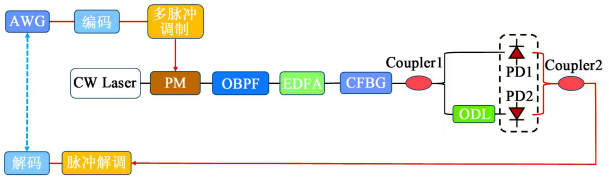


图 8　超宽带信号传输系统结构图

2.2　理论分析

本文采用 DS-BPSK 方式对 AWG 发出的脉冲序列进行调制。

超宽带中第 k 个用户的 DS-BPSK 超宽带信号表示为

$$s^{(k)}(t)=\sum_{n=1}^{N_d}\sum_{j=0}^{N_s-1}(c_d)_j^{(k)}d_n^{(k)}w(t-nT_d-jT_f) \tag{2}$$

其中，$w(t)$ 表示超宽带信号的脉冲波形；d_n 表示经编码后的信息序列，共有 N_d 位，$d_n=1$ 代表信息码元“1”，$d_n=-1$ 代表信息码元“0”；$T_d=N_sT_f$ 表示 symbol 的时间间隔；N_s 表示 1 个 symbol 需要的脉冲数；T_f 表示脉冲重复间隔；c_d 表示伪随机码序列，用来确定第 n 个信息位中第 j 个脉冲的相位，长度为 N_s，值为+1 或−1。

以二阶超宽带脉冲为例，在 Opti-system 中演示 DS-BPSK 调制，可以得到如图 9 所示的仿真结果。从图中可以看出，symbol 为“1”和“0”，每个 symbol 包含 10 个 frame。对应 symbol 为“1”的 10 个脉冲的极性为“1 1 −1 −1 −1 1 1 −1 1 −1 −1”，对应 symbol 为“0”的 10 个脉冲的极性为“−1 −1 1 1 1 −1 1 −1 1 1”。

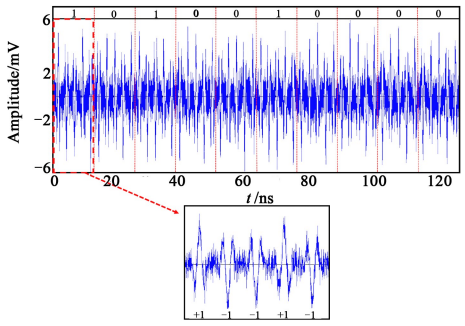


图 9　DS-BPSK 调制信号仿真结果

2.3　仿真验证及结果分析

使用 Opti-system 与 Matlab 软件对系统进行仿真测试。序列发生器发出二进制序列“10110”，并对其进行卷积编码，输出序列为“1010010000”。在 DS-BPSK 调制中，DS 设置 5 位扩频码，在 Matlab 中随机取数后得到“+1 −1 −1 +1 −1”。将 DS-BPSK 序列扩频，将“+1”扩频为“+1 0 0 0 0”，将“−1”扩频为“−1 0 0 0 0”，通过示波器观察可以看到如图 10 所示的 DS-BPSK 脉冲序列。

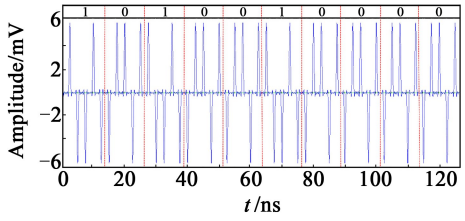


图 10　卷积编码后的 DS-BPSK 多脉冲调制序列

将上述高斯脉冲序列输入到二阶超宽带信号发生器的相位调制器中，并在 BPD 后的示波器观察到和高斯脉冲序列极性一致的二阶超宽带信号，如图 11 所示。信号在光域中经过了一段长度为 20 km、色散系数为 20 ps/nm/km、衰减系数为 0.3 dB/km 的单模光纤，用啁啾布拉格光栅对信号进行色散补偿，补偿量为−280 ps/nm。

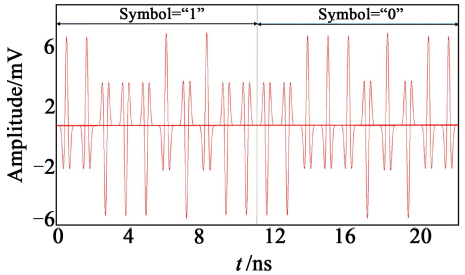


图 11　DS-BPSK 序列的二阶超宽带信号时域波形

为了分析 DS-BPSK 多脉冲调制的优势，本文同时进行了无 DS-BPSK 多脉冲调制情况下的测试。最后得出传输误码率和光功率的关系曲线如图 12 所示。经过比较，使用 DS-BPSK 多脉冲调制方式，以及使用啁啾布拉格光栅进行色散补偿，在前向纠错门限为 3.8×10^{-3}，经过 20 km 光纤传输时，接收机灵敏度提升了 5.5 dBm，有效提升了光载超宽带系统的传输性能。

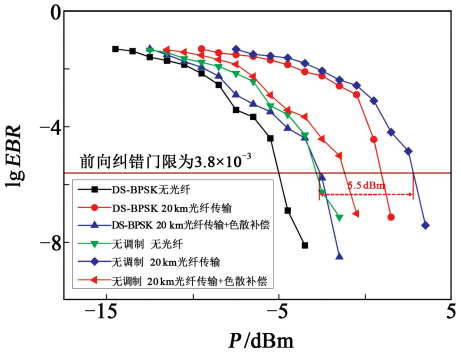


图 12 误码率和光功率的曲线图

3 结论

本论文提出并实验验证了一种基于微波光子技术产生超宽带信号的系统，能够以较为简单的结构生成二阶超宽带信号。生成的超宽带信号符合 FCC 的掩膜要求，频谱具有 5.4 GHz 的中心频率和 4.3 GHz 的 10 dB 带宽。另外，本文还使用多脉冲调制技术、色散补偿技术和编码解码技术，有效降低了光载超宽带系统传输的误码率。在前向纠错门限为 3.8×10^{-3}，经过 20 km 光纤传输时，接收机灵敏度提升了 5.5 dBm。

参考文献：

[1] Yao J P. Photonics for ultrawideband communications[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(4): 82-95.

[2] 何 刚，瞿鹏飞，孙力军. 微波光子技术应用现状及趋势[J]. 半导体光电，2017，38(5)：627-632.
He Gang, Qu Pengfei, Sun Lijun. Application status and trend of microwave photonic technology [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(5): 627-632.

[3] Yao J P. Microwave photonics[J]. J. Lightwave Technol., 2009, 27(3): 314-335.

[4] Zeng F, Yao J P. An approach to ultrawideband pulse generation and distribution over optical fiber [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18(7): 823-825.

[5] Zeng F, Yao J P. Ultrawideband impulse radio signal generation using a high-speed electrooptic phase modulator and a fiber-Bragg grating-based frequency discriminator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18(19): 2062-2064.

[6] Li J Q, Xu K, Fu S N, et al. Photonic polarity-switchable ultra-wideband pulse generation using a tunable Sagnac interferometer comb filter[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2008, 20(15): 1320-1322.

[7] Wang Q, Yao J P. An electrically switchable optical ultra-wideband pulse generator[J]. J. Lightwave Technol., 2007, 25(11): 3626-3633.

[8] Zeng F, Wang Q, Yao J P. All-optical UWB impulse generation based on cross-phase modulation and frequency discrimination[J]. Electron. Lett., 2007, 43(2): 121-122.

[9] Wang Q, Yao J P. Switchable optical UWB monocycle and doublet generation using a reconfigurable photonic microwave delay-line filter[J]. Opt. Express, 2007, 15(22): 14667-14672.

[10] Wang Q, Zeng F, Blais S, et al. Optical ultra-wideband monocycle pulse generation based on cross-gain modulation in a semiconductor optical amplifier[J]. Opt. Lett., 2006, 31(21): 3083-3085.

[11] 王 旭，梁晓东，李 淼，等. 基于偏振控制的 Sagnac 环负系数微波光子滤波器[J]. 半导体光电，2013，34(2)：204-207，240.
Wang Xu, Liang Xiaodong, Li Miao, et al. Photonic microwave band-pass filter with negative coefficients based on Sagnac fiber ring[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(2): 204-207, 240.

[12] 张 恒. 微波光子学中微波与超宽带信号光学产生技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2012.
Zhang H. Research on photonic generation of microwave and ultra-wideband signals in microwave photonics [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.

[13] 李 沫. 超宽带信号的光产生及处理技术的研究[D]. 长春：吉林大学，2012.
Li Mo. Photonic generation and modulation research for ultra-wideband signals[D]. Changchun: Jilin University, 2012.

[14] Win M Z, Scholtz R A. Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications [J]. IEEE Trans. on Communications, 2000, 48(4): 679-691.

[15] Zhao B, Chen Y F, Green R J. Average SINR analysis of DS-BPSK UWB systems with IPI, ICI, ISI, and MAI and its application[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technol., 2009, 58(8): 4690-4696.

作者简介：

王子健(1989—)，男，陕西省西安市人，硕士研究生，主要从事微波光子超宽带技术的研究；

董 玮(1973—)，女，黑龙江省富锦市人，博士，教授，博士生导师，从事微波光子学方面的研究。