

基于微波光子学的多频段双啁啾信号的产生方案

李浩宇¹, 张 骄^{1,2*}

(1. 山西大学 物理工程学院, 山西 太原 030006; 2. 无线通信与检测山西省重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 提出了一种基于外电光调制技术的并联单驱马赫曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)的多频段双啁啾信号产生方案, 该方案无需添加任何光学滤波器与偏振控制器, 大大简化了系统结构, 提高了系统整体的可调谐性。本方案中, mzm1 外加射频(Radio Frequency, RF)信号(11 GHz)用来控制产生的双啁啾信号的中心频率, 通过控制mzm1的调制指数来产生正负一、三、五阶的光频梳。同时, RF信号的频率改变不会影响系统的稳定性, 不需要重新配置系统结构参数。mzm2 外加一个单啁啾信号, 在小信号调制下, mzm2工作在推挽状态, 直流偏压为mzm的半波电压(V_{π}), 此时可以产生正负一阶边带。最后, mzm1与mzm2输出的光边带混合送入光电调制器拍频产生多频段双啁啾信号。本方案产生的一三五阶双啁啾信号的时间带宽积均为加入的单啁啾信号的两倍, 其中, 一阶双啁啾信号的峰值旁瓣抑制比为13.82 dB, 脉冲压缩比为理论上限值的90.1%; 三阶双啁啾信号的峰值旁瓣抑制比为13.98 dB, 脉冲压缩比为理论上限值的82.6%; 五阶双啁啾信号的峰值旁瓣抑制比为13.79 dB, 脉冲压缩比为理论上限值的87.7%。

关键词: 微波光子学; 多频段双啁啾信号; 马赫曾德尔调制器; 光频梳; 短时傅里叶变换

中图分类号: TN98

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2026006

引用格式: 李浩宇, 张 骄. 基于微波光子学的多频段双啁啾信号的产生方案[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 706-715.

LI Haoyu, ZHANG Jiao. Generation scheme of multi-band dual-chirp signals based on microwave photonics [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(6): 706-715.

Generation Scheme of Multi-Band Dual-Chirp Signals Based on Microwave Photonics

LI Haoyu¹, ZHANG Jiao^{1,2*}

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Wireless Communication and Detection, Taiyuan 030006, China)

Abstract: This paper proposes a generation scheme for multi-band double-chirp signals using a parallel single-drive Mach-Zehnder modulator (MZM) based on external electro-optic modulation technology. This scheme does not require any additional optical filters or polarization controllers, which greatly simplifies the system structure and improves the overall tunability of the system. In this scheme, a radio frequency (RF) signal (11 GHz) is applied to the mzm1 to control the center frequency of the generated dual-chirp signals. This scheme generate optical frequency combs of positive and negative first, third, and fifth orders by controlling the modulation index of the mzm1. Meanwhile, changes in the frequency of the RF signal will not affect the stability of the system, and there is no need to reconfigure the structural parameters of the system. An additional single-chirp signal is applied to the mzm2. Under small-signal modulation, the mzm2 operates in a push-pull state, and the DC bias voltage is the half-wave voltage (V_{π}) of the MZM. At this time, positive

收稿日期: 2024-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12403009)

作者简介: 李浩宇(2000-), 男, 硕士生, 主要从事微波光子学研究。E-mail: zlihaoyuz@126.com。

* 通信作者: 张 骄(1986-), 女, 副教授, 博士, 主要从事阵列天线及其信息重建研究。E-mail: zhangjiao@sxu.edu.cn。

and negative first-order sidebands can be generated. Finally, the optical sidebands output by the mzm1 and mzm2 are mixed and fed into a photodetector (PD) for beating to generate a multi-band double-chirp signal. The time-bandwidth products of the first-, third-, and fifth-order double-chirp signals generated by this scheme are all twice that of the added single-chirp signal. Among them, the peak sidelobe suppression ratio of the first-order double-chirp signal is 13.82 dB, and the pulse compression ratio is 90.1% of the theoretical upper limit value. The peak sidelobe suppression ratio of the third-order double-chirp signal is 13.98 dB, and the pulse compression ratio is 82.6% of the theoretical upper limit value. The peak sidelobe suppression ratio of the fifth-order double-chirp signal is 13.79 dB, and the pulse compression ratio is 87.7% of the theoretical upper limit value.

Key words: microwave photonics; multi-band dual-chirp signals; Mach-Zehnder modulator; optical frequency comb; short-time Fourier transform

0 引言

现代雷达不仅应用在军事上,也应用在日常生活中,这对雷达的频段可切换提出了更高的要求^[1-4]。众所周知,X波段(8~12 GHz)雷达主要用于对目标精度要求较高的场合,为军事系统提供目标的精确位置信息,以便进行攻击,但是该波段雷达的传播损耗较大,探测距离较近;Ka波段(27~40 GHz)雷达的设备体积较小,带宽比较大,分辨率也较高,一般用于地图测绘、卫星通信等领域;毫米波段(30~300 GHz)雷达天线口径较小,波束较窄,易于仰俯角跟踪,抗地面多径和杂波干扰能力强,在尘埃、烟尘和干雪等干性大气污染条件下穿透性好,检测能力强,但是,雨、雾、湿雪等高潮湿环境对毫米波衰减大,影响大功率器件和插损,会降低探测距离。

雷达波形生成是关键技术之一。传统的电子方法产生啁啾信号会受到严重的电磁干扰与电器件本身的速率瓶颈与带宽限制,无法满足现代雷达探测的需求。同时,由于多普勒效应的影响,单啁啾信号的速度分辨力远不如双啁啾信号^[5-6]。2015年,加拿大渥太华大学Zhu等^[7]率先通过外插混频的方法产生双啁啾信号。2017年,浙江大学Xu等^[8]首次使用串联马赫增德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)的结构产生双啁啾信号,但是实验生成的双啁啾信号的功率不同,不利于实际应用。2014年,清华大学Wang等^[9]通过数值分析方法计算出MZM的偏置电压,生成了五、七阶光频梳。2019年,空军工程大学Zhang等^[10]使用Wang等生成的五阶光频梳作为激光器的输入信号,实验生成了中心频率分别为10、20、30、40 GHz的双啁啾信号。2022年,北京邮电大学Qu等^[11]通过控制功分器的分光比,并

使用平衡探测器进行拍频产生了多频段可切换的双啁啾信号,但是该结构的可调谐性较差且使用的器件较多,实际操作不易控制。2023年,中国科学院大学Li等^[12]使用偏振控制器及对单啁啾信号单边带调制的方法产生了倍频因子可调的多频段双啁啾信号,并在一定程度上抑制了光信号在单模光纤传播过程中的功率衰落问题。近年来,单双啁啾信号可切换的方法也在研究之中^[13-14]。

本文提出的并联MZM产生多频段双啁啾信号的方法不需要使用光学滤波器,该结构可调谐强,不需要随时控制MZM的偏置电压与偏振控制器的偏振状态,只使用两个单驱MZM就可以产生多频段双啁啾信号,劣势在于需要精确控制mzm1的调制系数。通过实验发现,在雷达的接收端,啁啾信号的匹配滤波过程也比较理想,脉冲压缩比接近时间带宽积。

1 多频段双啁啾信号生成原理

多频段双啁啾信号的生成原理示意图如图1所示,激光器发出的信号为

$$E_{in}(t) = E_0 e^{j\omega_0 t}, \tag{1}$$

式中: E_0 为激光器输出的振幅大小; ω_0 为激光器的频率大小。激光器发出的光信号是线性偏振光。

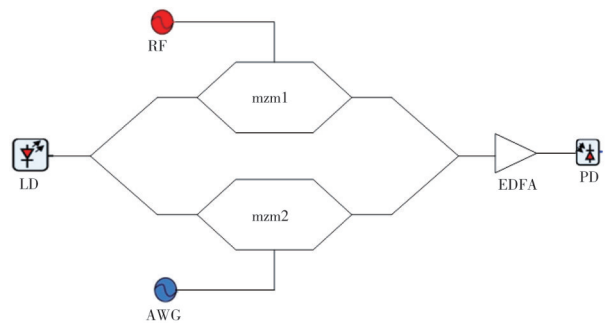


图1 结构示意图
Fig. 1 Structural schematic diagram

激光器发出的光信号经光功分器分别传输给mzm1和mzm2。mzm1和mzm2均工作在推挽状态，mzm1上面加入射频(Radio Frequency, RF)信号与光信号进行混合，mzm2下面加入单啁啾信号与光信号进行混合，最后，mzm1与mzm2输出的信号经光功率合成器混合送入光电探测器(Photo-Detector, PD)进行拍频，生成多频段双啁啾信号。

mzm1输出的光信号为

$$E_1(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 e^{j\omega_0 t} (e^{j\beta_1 \cos \omega_{RF} t} e^{j\Delta\varphi} + e^{-j\beta_1 \cos \omega_{RF} t}) = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 e^{j\omega_0 t} \left(- \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(\beta_1) e^{jn\omega_{RF} t} + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n j^n J_n(\beta_1) e^{jn\omega_{RF} t} \right) = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 e^{j\omega_0 t} \cdot (-2jJ_1(\beta_1))(e^{j\omega_{RF} t} + e^{-j\omega_{RF} t}) + 2jJ_3(\beta_1)(e^{j3\omega_{RF} t} + e^{-j3\omega_{RF} t}) - 2jJ_5(\beta_1)(e^{j5\omega_{RF} t} + e^{-j5\omega_{RF} t}), \quad (2)$$

式中： $\beta_1 = \pi V_{RF} / V_\pi$ ， V_{RF} 为射频信号的振幅， V_π 为MZM的半波电压。 $\Delta\varphi = \pi$ ，通过控制 β_1 的大小实现正负一、三、五阶光频梳的生成。本文根据式(3)做出贝塞尔函数曲线，如图2所示。

$$J_n(\beta) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m+n+1)} \left(\frac{\beta}{2} \right)^{2m+n}. \quad (3)$$

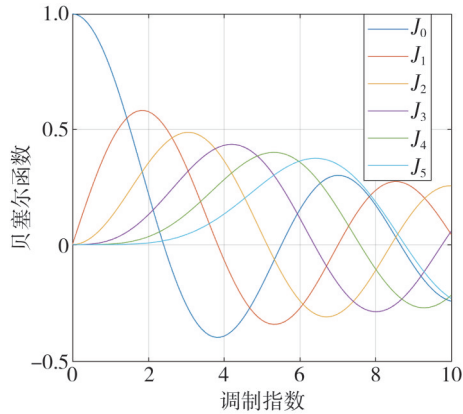


图2 贝塞尔函数曲线图

Fig. 2 Curve graph of Bessel function

通过实验验证发现，在 $\beta_1 = 5.1$ 时， $J_1(\beta_1) \approx J_3(\beta_1) \approx J_5(\beta_1)$ ，意味着后文生成的一三五阶双啁啾信号的功率大致相等，有利于在雷达系统的接收端进行匹配滤波，且 $J_7(\beta_1)$ 的值较小，即峰值旁瓣的抑制比较好。从图3可以看出，五阶边带与七阶边带的差值为13.31 dBm，一三五阶边带的抖动较小，近似可以忽略。从图中还可以看到，在正负七阶光边带的旁边还存在着正负九阶光边带，但是它的功率相较图中的其余边带已经很

低，也可以忽略不计。系统设置的噪声基底为-100 dBm，正负一三五阶光信号的信噪比在90 dBm左右，正负七阶光信号的频谱也在-70 dBm以上，这说明本方案通过mzm1产生的光电混合信号的质量较好。

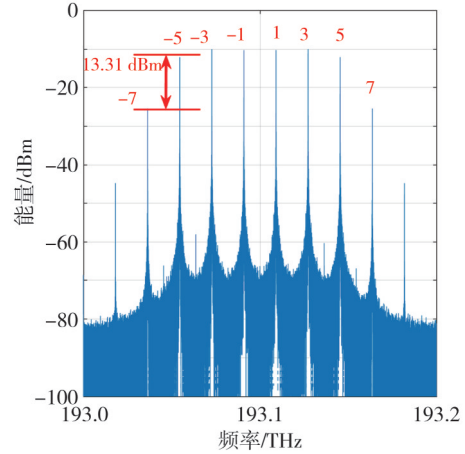


图3 mzm1输出光谱图

Fig. 3 The spectrogram output by MZM1

同理，mzm2输出的光信号的表达式如式(4)所示， β_2 满足小信号调制状态，且 $\Delta\varphi = \pi$ ，根据式(3)和式(4)，可以得到此时mzm2只输出正负一阶边带。同时，为了使PD的响应更好，在光信号进入PD前，可以使用掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)对其进行放大。PD输出的电信号的表达式如式(5)所示，值得注意的是，从式(5)的结果可以看到，双啁啾信号的中心频率全是奇数阶，射频信号的频率全是偶数阶。这意味着射频信号并不会对双啁啾信号的性能产生影响，这也是并联mzm产生双啁啾信号的优点之一，与之对应的PD输出的电信号波形图如图4所示。

$$E_2(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 e^{j\omega_0 t} (e^{j\beta_2 \cos kt^2} e^{j\Delta\varphi} + e^{-j\beta_2 \cos kt^2}) = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 e^{j\omega_0 t} \left(- \sum_{n=-\infty}^{+\infty} j^n J_n(\beta_2) e^{jnkt^2} + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n j^n J_n(\beta_2) e^{jnkt^2} \right) = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 e^{j\omega_0 t} (-2jJ_1(\beta_2))(e^{jkt^2} + e^{-jkt^2}), \quad (4)$$

$$i = EE^* = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_1(t) + E_2(t))^* \frac{\sqrt{2}}{2} (E_1(t) + E_2(t)) \propto \cos(kt^2) + \cos(\omega_{RF} t \pm kt^2) + \cos(3\omega_{RF} t \pm kt^2) + \cos(5\omega_{RF} t \pm kt^2) + \cos(2\omega_{RF} t) + \cos(4\omega_{RF} t) + \cos(6\omega_{RF} t) + \cos(8\omega_{RF} t) + \cos(10\omega_{RF} t). \quad (5)$$

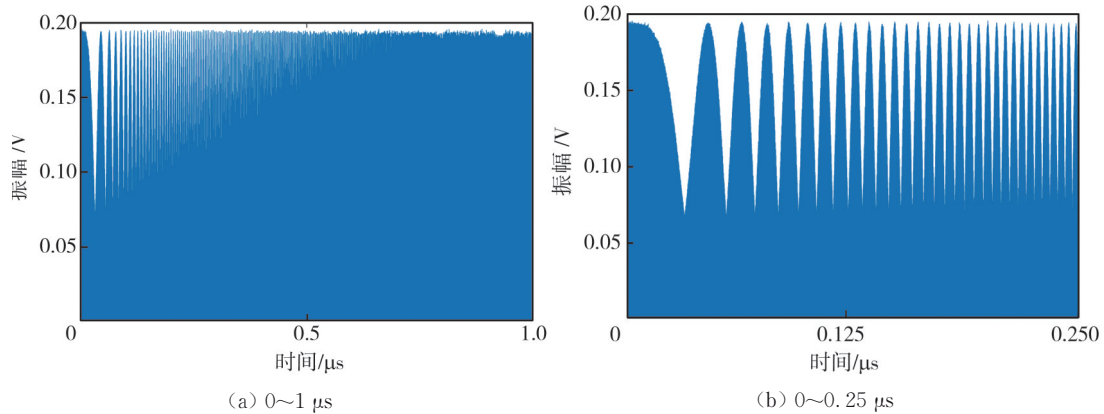


图 4 PD 输出的波形图

Fig. 4 Waveform diagram output by PD

本实验加入的任意信号发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)信号是时间脉冲宽度为 $1 \mu\text{s}$, 带宽为 0.5 GHz 的单啁啾信号, PD 输出的信号脉冲宽度同样为 $1 \mu\text{s}$, 如图 4(a) 所示。但是, 图 4(a) 对 PD 输出信号的频率随时间的变化趋势反映的不是很明显, 又绘制出了 $0 \sim 0.25 \mu\text{s}$

的时域波形图, 如图 4(b) 所示。同时, 为了更直观地反映本实验产生的双啁啾信号与加入的单啁啾信号的频谱变化, 又分别画出了单啁啾信号的频谱图, 与中心频率为 ω_{RF} 的双啁啾信号的频谱放大图进行对比, 如图 5 所示。其余各阶双啁啾信号同理, 不再一一画出。

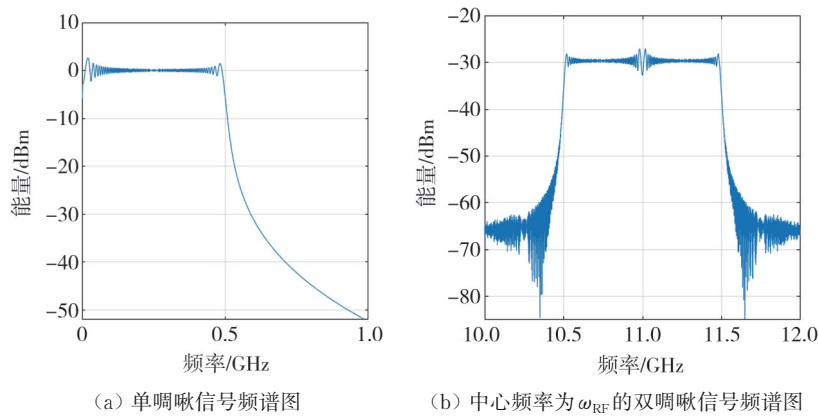


图 5 单啁啾信号与中心频率为 ω_{RF} 的双啁啾信号频谱图

Fig. 5 Spectrograms of single chirp signals and double chirp signals with a center frequency of ω_{RF}

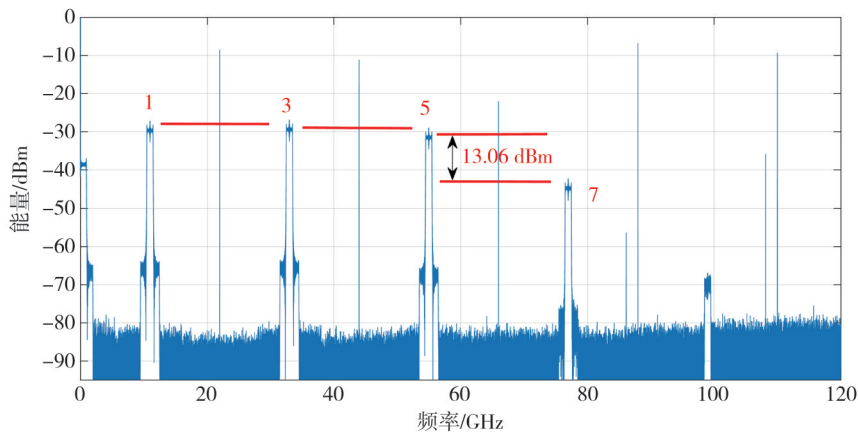


图 6 PD 输出的频谱图

Fig. 6 Spectrogram output by PD

从图5可以看到,单啁啾信号经过本文提出的系统后,中心频率变为了RF信号的频率,带宽变成原来的两倍,结合图4,脉冲持续时间与原来保持不变,时间带宽积变成原来的两倍。根据雷达原理,雷达系统的距离分辨率与信号的带宽成正比,这意味着雷达信号的带宽越大,其距离分辨率就会越高。与式(5)对应的PD输出的整体频谱图如图6所示。

从图6可以看出,实验结果与式(5)基本吻合,中心频率为 ω_{RF} , $3\omega_{RF}$, $5\omega_{RF}$ 的双啁啾信号已经生成,同时射频信号的频率与式(5)基本一致。值得注意的是,在 $8\omega_{RF}$, $10\omega_{RF}$ 的左边存在着一些旁瓣,这是由于mzm调制器的分光比偏离理想状态的1:1,导致其上下两路的光功率出现差异,部分偶数阶边带没法完全抵消。但是,这对本文想要的信号并没有影响,首先由于这些射频频率离双啁啾信号的频段较远,其次在必要的时候,可以使用电带通滤波器很容易地滤出想要的信号。

2 实验结果与分析

为了更好地分析一三五阶啁啾信号,本文分别对一三五阶双啁啾信号做短时傅里叶变换与自相关函数来分析啁啾信号脉冲压缩性能。根据雷达原理可知,若自相关函数的主瓣较宽,意味着雷达系统的距离分辨率较低,脉冲压缩比也较低,而若峰值旁瓣较高可能会导致在速度分辨时出现模糊等情况。本实验采用的MZM的半波电压均为4 V,均工作在推挽状态(上下输入反相),直流偏置电压等于半波电压。MZM工作在最小偏置点,插入损耗设置为5 dB。激光器的功率设置为16 dBm,线宽为10 MHz,激光器处在线性偏振状态。AWG产生脉冲时间为1 μ s,带宽为0.5 GHz的单啁啾信号,RF信号的频率为11 GHz。EDFA的长度为5 m,PD的响应度为1 A/W。

2.1 一阶双啁啾信号

本文采用的射频信号为11 GHz,对应的双啁啾信号的一阶中心频率也是11 GHz,通过短时傅里叶变换(见图7)可以看到,双啁啾信号的上啁啾频率从11 GHz一直持续到11.5 GHz,下啁啾频率从11 GHz变化到10.5 GHz,并且是线性变化的。一阶双啁啾信号自相关函数图如图8

所示。

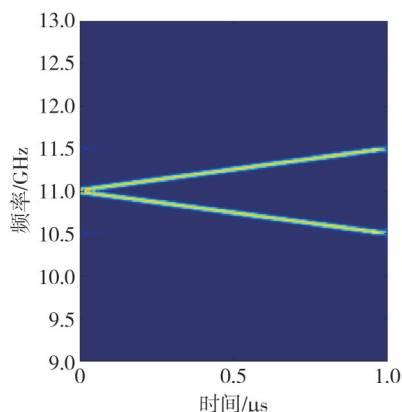
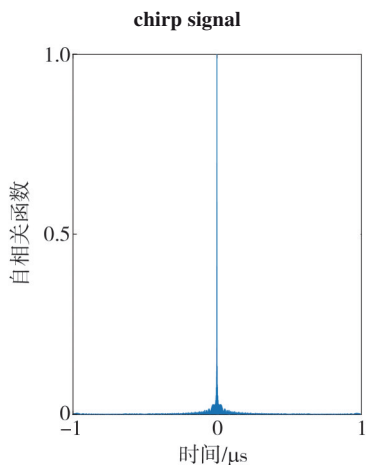
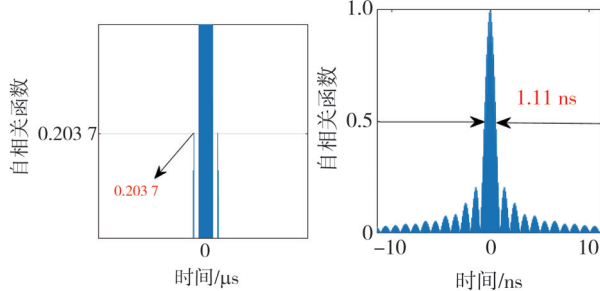


图7 一阶双啁啾信号短时傅里叶变换

Fig. 7 Short-time Fourier transform of the first-order double chirp signal



(a) 一阶双啁啾信号自相关函数



(b) 自相关函数峰值旁瓣

(c) 自相关函数放大

图8 一阶双啁啾信号自相关函数局部与全体图

Fig. 8 Local and overall graphs of the autocorrelation function of the first-order double-chirp signal

2.2 三阶双啁啾信号

与一阶双啁啾信号类似,分别做出了三阶双啁啾信号的短时傅里叶变换图像(见图9)与自相关函数图像(见图10)。

从图9可以看到,中心频率为33 GHz,上啁啾频率为33~33.5 GHz,下啁啾频率为33~32.5 GHz的双啁啾信号已经产生。该双啁啾信号的带宽为1 GHz,脉冲持续时间为1 μ s,频率随时间线性变化。

同样,三阶双啁啾信号的时间带宽积是原单啁啾信号的两倍,这说明本文产生的三阶双啁啾信号的性能良好。从图 10 可以看到,三阶双啁啾信号的峰值旁瓣抑制比为 13.98 dB,脉冲压缩比约等于 826,接近理论值 1 000。

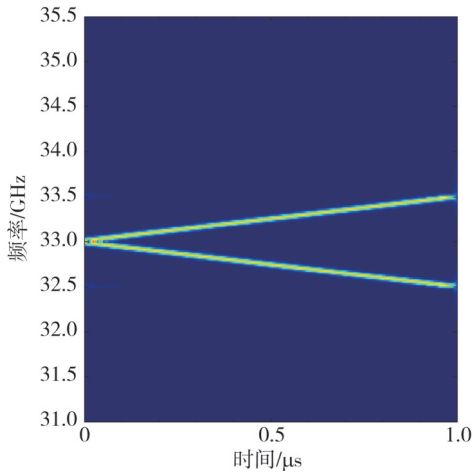


图 9 三阶双啁啾信号短时傅里叶变换
Fig. 9 Short-time Fourier transform of the third-order double-chirp signal

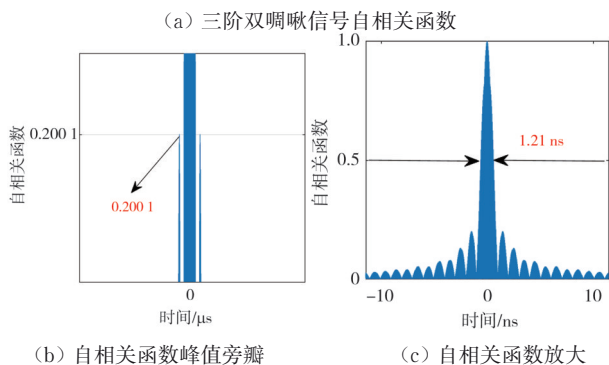
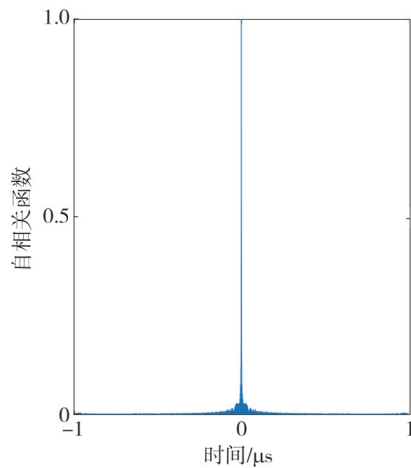


图 10 三阶双啁啾信号自相关函数局部与全体图
Fig. 10 Local and overall graphs of autocorrelation function of the third-order double-chirp signal

2.3 五阶双啁啾信号

类似的,五阶双啁啾信号的短时傅里叶变换

与自相关函数图像分别如图 11、图 12 所示。

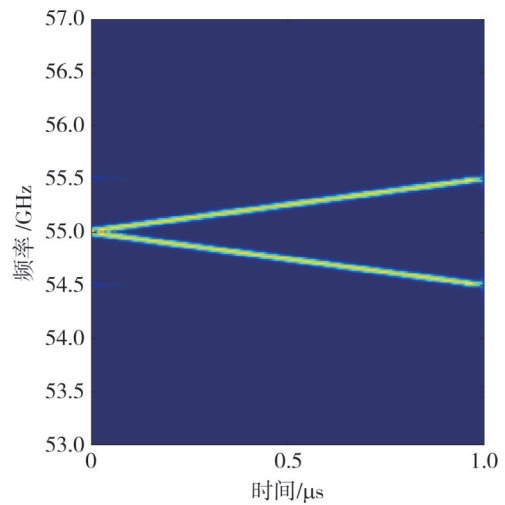


图 11 五阶双啁啾信号短时傅里叶变换
Fig. 11 Short-time Fourier transform of the fifth-order double-chirp signal

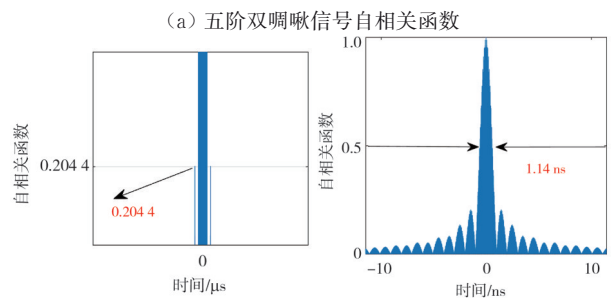
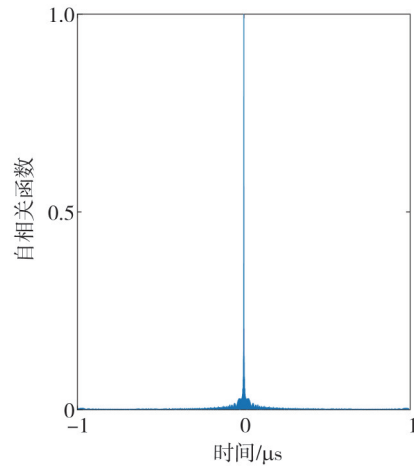


图 12 五阶双啁啾信号自相关函数局部与全体图
Fig. 12 Local and overall graphs of autocorrelation function of the fifth-order double-chirp signal

从图 11 可以看到,该双啁啾信号中心频率为 55 GHz,带宽为 1 GHz,脉冲持续时间为 1 μ s,上啁啾频率从 55 GHz 变化到 55.5 GHz,下啁啾频率从 55 GHz 变化到 54.5 GHz,并且频率随着时间线性变化。从图 12(b) 看出,中心频率为 55 GHz 的双啁啾信号的峰值旁瓣抑制比为

13.79 dB, 由图 12(c) 看出, 中心频率为 55 GHz 的双啁啾信号的脉冲压缩比为 877, 接近理论值 1 000。综上, 本文实验部分与理论基本吻合, 且实验产生的双啁啾信号的质量较好。

3 讨论与分析

为了证明本文提出的系统具有良好的可调谐性, 将 RF 信号的频率设置为 5 GHz (ω_{RF}), 系统的其余参数保持不变, 通过观察 PD 输出的频谱图 (图 13), 可以看到中心频率为 5 GHz (ω_{RF}), 15 GHz ($3\omega_{RF}$), 25 GHz ($5\omega_{RF}$) 的双啁啾信号被产生了。

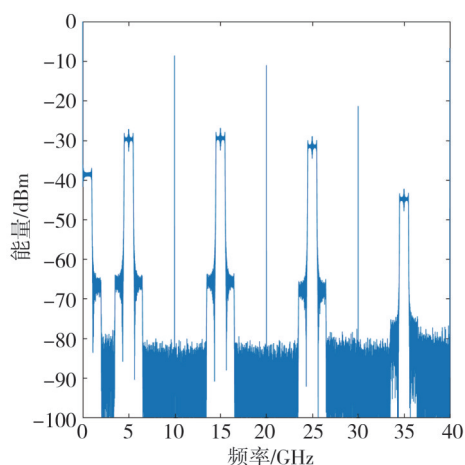


图 13 RF=5 GHz 对应的多频段双啁啾信号

Fig. 13 Multi-band dual-chirp signals corresponding to RF=5 GHz

可调谐性的范围与限制条件主要取决于光电探测器调制带宽的大小, 调制带宽越高, 光电探测器能够准确探测到的光信号的调制频率就越高, 也就意味着它可以处理更高速率的光通信信号和更快速变化的光脉冲。

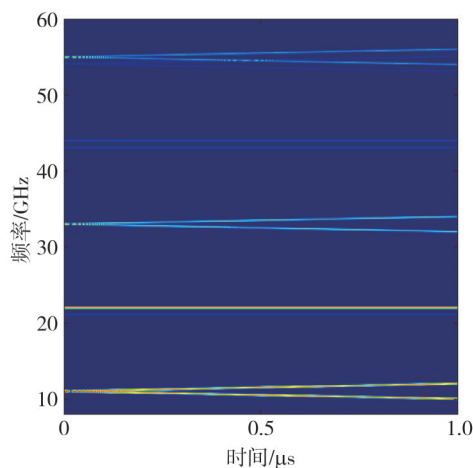
下面继续探讨不同参数对系统性能的影响, 以更全面地验证本方案的可行性与稳定性。具体来说, 就是通过分别改变 mzm2 上加入的单啁啾信号的带宽与脉冲持续时间, 然后对 PD 输出的时间信号做短时傅里叶变化观察生成的双啁啾信号的中心频率、带宽、脉冲持续时间以及频率随时间变化的关系。

3.1 改变单啁啾信号的带宽

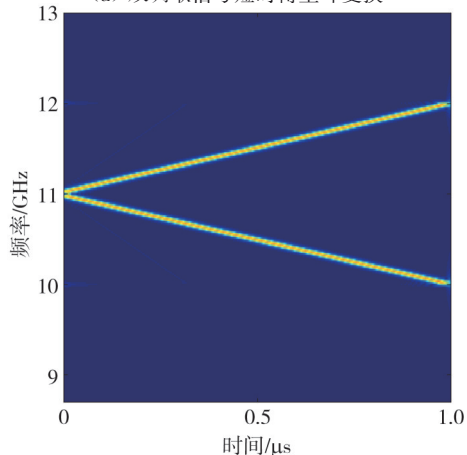
将 mzm2 上加入的单啁啾信号的带宽变为 1 GHz, 脉冲持续时间保持为 1 μ s。

将 PD 输出的波形图做短时傅里叶变换, 结果

如图 14 所示, 可以看出实验生成的双啁啾信号的中心频率为 11、33、55 GHz, 带宽变为 2 GHz, 是加入的单啁啾信号带宽的两倍, 脉宽持续时间与加入的单啁啾信号保持一致, 且低频信号的脉冲强度明显高于高频信号。同时, 在 22 GHz 和 44 GHz 存在射频信号, 表现在图中为随时间变化频率保持不变的线段, 与式(5)对应。



(a) 双啁啾信号短时傅里叶变换



(b) 对应的一阶双啁啾信号放大

图 14 带宽 2 GHz, 脉冲持续时间 1 μ s 双啁啾信号短时傅里叶变换及其对应的一阶双啁啾信号短时傅里叶变换放大图

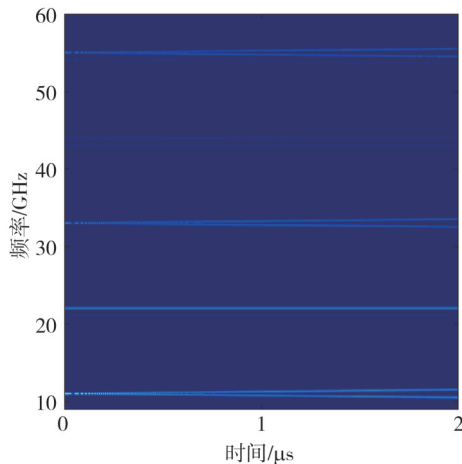
Fig. 14 Short-time Fourier transform of a double-chirp signal with a bandwidth of 2 GHz and a pulse duration of 1 μ s, and an enlarged view of the short-time Fourier transform corresponding to the first-order double-chirp signal

3.2 改变单啁啾信号的脉冲持续时间

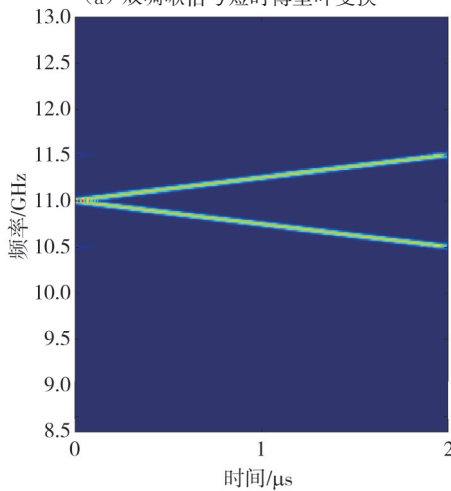
将 mzm2 上加入的单啁啾信号的脉冲持续时间变为 2 μ s, 带宽保持为 0.5 GHz。

与 3.1 节比较, 加入的单啁啾信号的带宽不变, 持续时间变大, 意味着信号频率随时间的变化率降低, 在图 15 中反映为斜率变小。从信号的频谱角度

来看,原本在较宽频率范围内分布的能量会随着调频斜率变小而向较低频率区域集中,信号的频谱结构发生改变。这可能导致雷达系统的距离分辨率下降,因为距离分辨率与信号带宽成反比关系,窄带宽信号难以区分距离上靠得很近的目标,不利于对目标信号的准确检测和定位。



(a) 双啁啾信号短时傅里叶变换



(b) 对应的一阶双啁啾信号放大

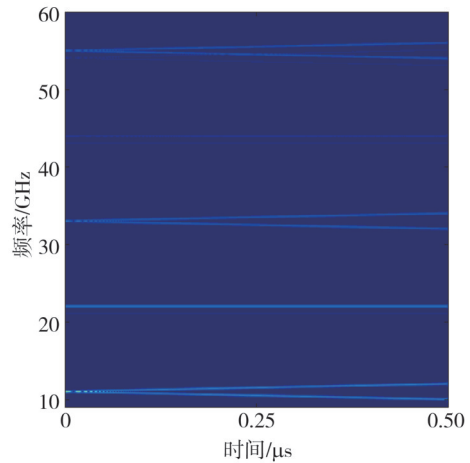
图 15 带宽 1 GHz, 脉冲持续时间 2 μs 双啁啾信号短时傅里叶变换及其对应的一阶双啁啾信号短时傅里叶变换放大图

Fig. 15 Short-time Fourier transform of a double-chirp signal with a bandwidth of 1 GHz and a pulse duration of 2 μs, and an enlarged view of the short-time Fourier transform corresponding to the first-order double-chirp signal

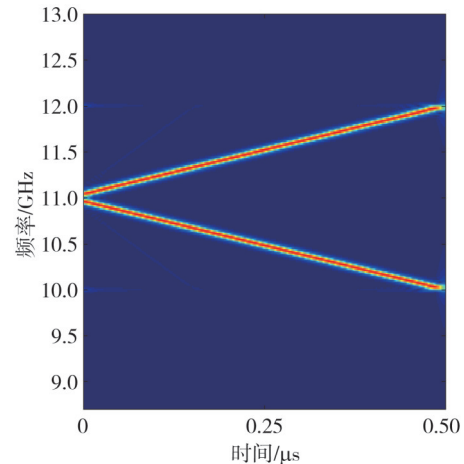
3.3 同时改变单啁啾信号的带宽与脉冲持续时间

将 mzm2 上加入的单啁啾信号的带宽变为 1 GHz, 脉冲持续时间变为 0.5 μs。

理论上这种情况是双啁啾信号的调频斜率最大, 如图 16 所示, 信号频率随着时间变化最快, 此时信号能量的分布较密集。



(a) 双啁啾信号短时傅里叶变换



(b) 对应的一阶双啁啾信号放大

图 16 带宽 2 GHz, 脉冲持续时间 0.5 μs 双啁啾信号短时傅里叶变换及其对应的一阶双啁啾信号短时傅里叶变换放大图

Fig. 16 Short-time Fourier transform of a double-chirp signal with a bandwidth of 2 GHz and a pulse duration of 0.5 μs, and an enlarged view of the short-time Fourier transform corresponding to the first-order double-chirp signal

根据距离分辨率与信号带宽成反比的关系, 这有助于提高雷达系统的距离分辨率, 能够更精确地区分距离上相近的目标; 此外, 调频斜率变大使得信号的频率变化加快, 这对信号的产生、发射、接收和处理等环节都提出了更高的要求。同时本文结果与参考文献[5-6, 8, 10]结果进行了对比, 如表 1 所示。

最后, 本文研究了产生的双啁啾信号的模糊函数, 并与单啁啾信号的模糊函数进行了比较。

单啁啾信号模糊函数是“斜刀刃”型, 如图 17 所示, 在时间延迟和多普勒频移方向上有一定的耦合, 即一个参数的变化会影响另一个参数的分辨。由于多普勒频移会使脉冲压缩后的信号发生变化, 进而影响对目标距离与速度的估计。

表 1 几种相关多频段双啁啾信号发生器的性能比较

Tab. 1 Performance comparison of several related multi-band dual-chirp signal generators

来源	是否产生两个边带以上的双啁啾信号	是否不需要偏振控制	使用的mzm个数是否小于等于两个	是否能抗色散传输
文献[5]	否	是	是	否
文献[6]	否	是	是	否
文献[8]	是	否	是	否
文献[10]	否	否	否	是
本文	是	是	是	否

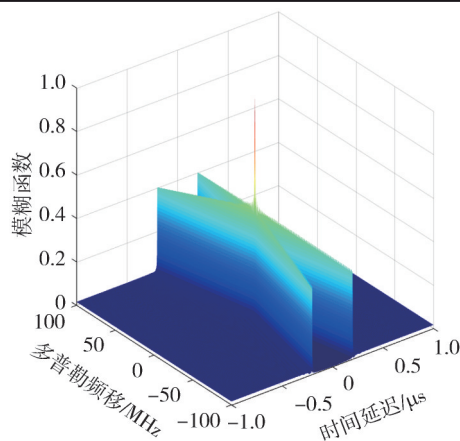


图 17 双啁啾函数模糊函数图像

Fig. 17 Ambiguity function image of double-chirp function

本文产生的双啁啾信号模糊函数更接近理想的“图钉”型，如图 18 所示，在时间延迟和多普勒频移方向上的耦合相对较弱，能更好地独立分辨目标的距离和速度。

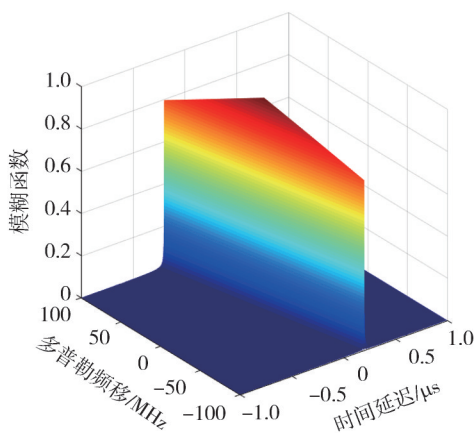


图 18 单啁啾函数模糊函数图像

Fig. 18 Ambiguity function image of single-chirp function

同时，双啁啾信号在提高雷达距离分辨率与速度分辨率的同时，也存在一些代价，主要包括：

1) 硬件要求提高。首先需要发射机能够产生高功率、高精度的双啁啾信号，同时在接收端接收机需要有更宽的带宽和更高的采样率来准确接收和数字化双啁啾回波信号。

2) 抗干扰性能可能会下降。双啁啾信号的频谱相对复杂，双啁啾信号的处理过程更容易受到

干扰的影响，导致信号的质量下降。

4 结 论

本文提出了一种新型的基于微波光子学的方案产生多频段双啁啾信号，并对该方案进行了原理分析与实验验证，证明了该方案的可行性与优越性。本方案产生的多频段双啁啾信号的时间带宽积为 1 000，是加入的单啁啾信号时间带宽积的两倍，提高了雷达的距离分辨率与速度分辨力。同时，本文通过分别改变 RF 信号的频率、单啁啾信号的带宽与持续时间证明了本方案产生的多频段双啁啾信号的可调谐性。最后，通过分析对比双啁啾信号与单啁啾信号的模糊函数，进一步说明了双啁啾信号在提高雷达的距离分辨力与速度分辨力方面的优越性。

参考文献：

- [1] ZHANG K, ZHAO S, YIN Y, et al. Photonic generation and transmission of linearly chirped microwave waveform with increased time-bandwidth product [J]. IEEE Access, 2019, 7: 47461-47471.
- [2] ZHAO H, MA J. Photonics-assisted multi-band dual linear/nonlinear chirp waveform generation based on optical phase modulation [J]. IEEE Access, 2021, 9: 151278-151284.
- [3] LI F, DU J, KONG Z, et al. Multi-band multi-format switchable microwave waveforms generation based on an AML-OEO [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(23): 8203-8210.
- [4] CHEN D, NI J P, BAI L, et al. Evaluation on safety performance of a millimetre wave radar-based autonomous vehicle [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11(1): 1-10.
- [5] ZHANG K, ZHAO S, LI Y, et al. Photonic-based dual-chirp microwave waveforms generation with multi-carrier frequency and large time-bandwidth product [J]. Optics Communications, 2020, 474: 126076.
- [6] DHAWAN R, PARIHAR R, CHOUDHARY A. Multiband dual- and cross-LFM waveform generation

- using a dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Communications*, 2023, 530: 129144.
- [7] ZHU D, YAO J. Dual-chirp microwave waveform generation using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27 (13): 1410-1413.
- [8] XU Y, JIN T, CHI H, et al. Photonic generation of dual-chirp waveforms with improved time-bandwidth product [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(15): 1253-1256.
- [9] WANG Q, HUO L, XING Y, et al. Ultra-flat optical frequency comb generator using a single-driven dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 3050-3053.
- [10] ZHANG K, ZHAO S, LIN T, et al. Photonic generation of multi-frequency dual-chirp microwave waveform with multiplying bandwidth[J]. *Results in Physics*, 2019, 13: 102226.
- [11] QU Z, MA J. Photonic-assisted generation of flexible and switchable multi-band linearly frequency modulated microwave waveforms[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(6): 5562809.
- [12] LI F, DU J, WANG L, et al. Photonic-based frequency-doubling dual-band dual-chirp microwave waveforms generation and anti-dispersion transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41 (21): 6684-6690.
- [13] LI P, YAN L, YE J, et al. Photonic approach for the generation of switchable down-, up-, and dual-chirped linear frequency-modulated microwave signals [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1990.
- [14] YI C, YANG S, YANG B, et al. Photonic approach for generating bandwidth-doubled and switchable multi-format chirp waveforms [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1578-1581.