

基于去调频接收技术的微波光子双波段线性调频连续波雷达

曹继明^{①②③} 李若明*^{①②} 杨继尧^{①②③} 孙强^{①②③} 李王哲*^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 该文提出一种基于光子辅助去调频接收技术的双波段线性调频连续波雷达方案, 该双波段雷达接收机基于平行架构光子混频器, 能够利用同一套硬件设备同时接收双波段雷达的回波信号。接收机中使用一个双偏振正交相移键控(DP-QPSK)调制器, 工作中将双波段雷达的两组参考信号和回波信号通过DP-QPSK调制器调制到正交偏振的光载波上, 调制后的双带光回波和参考信号经过放大和滤波后, 输入到偏振解复用相干接收机中进行光子辅助去调频处理。在发射机端, 对于具有更高频率和带宽的发射信号, 采用包含延时功能的光子倍频信号产生技术, 产生参考信号与发射信号的同时, 将发射信号延时, 使得在接收机端对相同距离目标的双带回波信号去调频得到的中频信号可在频域分离。实验中通过逆合成孔径雷达成像实验评估了该双波段雷达系统的性能, 该双波段雷达系统工作在C波段和Ku波段, 发射信号带宽分别为1 GHz和2 GHz, 接收机模拟-数字转换器的采样率为100 MSa/s。实验结果证明微波光子技术能为双波段线性调频连续波雷达提供有效的实现方案。

关键词: 线性调频连续波雷达; 双波段雷达; 光子混频器; 光子倍频技术; 去调频处理

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2019)02-0189-09

DOI: 10.12000/JR18119

引用格式: 曹继明, 李若明, 杨继尧, 等. 基于去调频接收技术的微波光子双波段线性调频连续波雷达[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 189–197. doi: 10.12000/JR18119.

Reference format: CAO Jiming, LI Ruoming, YANG Jiyao, *et al.* Dual-band LFM-CW radar scheme based on photonic stretch processing[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(2): 189–197. doi: 10.12000/JR18119.

Dual-band LFM-CW Radar Scheme Based on Photonic Stretch Processing

CAO Jiming^{①②③} LI Ruoming*^{①②} YANG Jiyao^{①②③}
SUN Qiang^{①②③} LI Wangzhe*^{①②}

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China*)

^③(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A dual-band LFM-CW radar scheme which is based on photonic stretch processing is proposed. The receiver which is based on a photonic frequency down-converter is able to receive the radar echoes of two bands with a single hardware. A dual polarization quadrature phase shift keying modulator is employed to implement the modulation scheme. The reference signals and echoes of two bands are modulated to orthogonally polarized light waves and sent to a Pol-demux coherent receiver through an amplifier and a filter, respectively, to perform stretch processing. In the transmitter, the reference and transmitted LFM signals with high frequency and wide bandwidth are generated by a photonic-assisted frequency multiplication module. Meanwhile, the

收稿日期: 2018-12-25; 改回日期: 2019-01-15; 网络出版: 2019-03-29

*通信作者: 李若明 rmlj@ieee.org; 李王哲 wzli@mail.ie.ac.cn

*Corresponding Author: LI Ruoming, rmlj@ieee.org; LI Wangzhe, wzli@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701476, 61690191)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701476, 61690191)

责任编辑: 邢孟道 Corresponding Editor: XING Mengdao

generated signal is delayed before transmission. Thus, at the output of the coherent receiver, IF signals corresponding to two bands can be separated in the frequency domain. An experimental system operating in C- and Ku-bands with transmitting signal bandwidths of 1 and 2 GHz, respectively, is demonstrated and evaluated via a series of inverse synthetic aperture radar imaging tests, and the sampling rate of analog to digital converters is 100 MSa/s. The results show that the microwave photonics technology can provide solutions for receiving dual-band signal with a single hardware platform.

Key words: LFM-CW radar; Dual-band radar; Photonics-assisted mixer; Photonic frequency multiplication; Stretch processing

1 引言

雷达广泛用于目标成像、追踪以及目标识别等应用中^[1,2]。脉冲压缩技术是雷达信号处理中常用的处理方法,它通过调制发射信号和对接收信号进行匹配滤波,从而化解发射信号功率与雷达对目标的距离分辨率之间的相互制约关系,而线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号是最基本且应用最广泛的脉冲压缩波形^[3,4]。为了提高雷达的距离分辨率,需要发射更大带宽的LFM信号,但同时这也要求模数转换器(Analog to Digital Converters, ADC),射频混频器和信号处理器等器件具有对大带宽信号的处理能力^[5]。去调频技术通过将雷达全部时域回波转换为距离相关的窄带中频信号,获得高分辨率图像的同时,极大地缓解了对ADC采样速率的要求^[6]。由于实际场景对不同波段的电磁波反射特性不同,工作在多波段的雷达系统能够获得场景的更多信息,因此多波段雷达系统有助于目标识别性能的提升和雷达分辨率的提高^[7,8]。但是,对于去调频处理而言,针对相同的观测目标,不同波段回波信号去调频得到的中频信号可能出现频率重叠,特别地,当双带的调频率相同时,双带回波去调频后的波形频谱完全重叠。因此,对于传统电学雷达系统,一般需要多个雷达接收系统对雷达在不同波段的回波信号进行接收,显而易见,这样会增大系统的体积和能耗等指标。

微波光子技术由于具有对大带宽信号的处理能力,近年来被引入到雷达系统中以提升现代雷达系统的性能^[9-13],目前已开展了一些采用光子技术的多波段雷达系统和光子辅助多波段雷达信号接收系统的研究^[14-16]。其中,意大利研究团队在发射端利用一个锁模激光器(Mode Locked Laser, MLL)实现光子变频技术,产生雷达发射波形,在接收端对雷达回波进行基于光采样的下变频处理,通过将雷达回波调制到MLL产生的光脉冲串,经过串并转换将高速串行采样光脉冲转换为并行低速脉冲,最后再用低速、高比特ADC进行并行时域交织采样^[14]。然而,该方案接收机的带宽实质上受限于光串并转

换器的带宽。为了同时接收具有大带宽的双波段雷达回波信号,去调频技术被引入到双波段雷达接收机中来缓解对ADC采样速率的要求。北京邮电大学研究团队在发射端使用正和负不同调频率的LFM信号作为双波段发射信号,接收机端利用光子I/Q混频器对双波段雷达信号进行去调频接收,从而得到频率分别为正和负的复中频信号^[15]。然而,由于器件性能引起的I路和Q路信号幅度和相位的失配会降低该系统镜像抑制的性能,从而限制了对宽带信号的操作效果。

本文提出一种光子辅助双波段连续波雷达去调频接收方案,该双波段雷达接收机基于光子频率下变频器^[17]。在发射机端,利用光子倍频技术产生宽带雷达发射信号,通过光延迟线将一个波段的发射LFM信号引入适当的时延,在接收端,利用光子辅助去调频技术同时接收双波段雷达的回波信号,从而可以通过低速ADC对双波段信号进行采样,且不同波段去调频得到的中频信号互不干扰。对于不同的探测场景,可以通过调节发射端延迟量的大小使不同波段去调频得到的中频信号位于不同的频率,从而可以使用同一套接收设备对不同波段的雷达回波进行同时接收。在接收机中,用一个双偏振正交相移键控(Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying, DP-QPSK)调制器替代了文献^[9]中的双偏振二进制相移键控(Dual-Polarization Binary Phase Shift Keying, DP-BPSK)调制器,其中DP-QPSK调制器包含2个分支,每个分支包含由2个子马赫曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)组成的QPSK调制器,在DP-QPSK调制器的输出端两个分支的光波通过偏振合束实现光波的偏振正交复用,双波段雷达系统的两对参考信号和回波信号通过4个子MZM调制到光载波上。通过调节直流偏置电压的大小,使4个子MZM工作在最小偏置点以压制光载波和其他偶阶光边带,选择参考信号和回波信号调制之后的1阶光边带进行光子辅助去调频处理,得到双波段雷达回波的去调频中频信号,再通过后续数字信号处理提取目标的信息。

2 结构与原理

提出的光子辅助去调频接收双波段雷达系统架构如图1所示，双波段雷达实验演示系统工作在C波段和Ku波段，该双波段雷达系统由双波段雷达发射机、两对天线和双波段雷达接收机组成。其中，接收机中使用的DP-QPSK调制器包含上下两条光路，每条路径分别对应一个偏振方向，且每条路径都包含一个由2个子MZM构成的QPSK调制器，如图1(b)所示。在系统中，分别使用X和Y代表两个正交的偏振方向，则双波段接收机中使用的DP-QPSK调制器的4个子MZM可分别表示为偏振方向为X的2个调制器 X_I 和 X_Q 以及偏振方向为Y的2个调制器 Y_I 和 Y_Q 。其中，C波段的雷达参考信号和回波信号通过调制器 X_I 和调制器 Y_I 调制到光载波上，这两路调制后的光信号经偏振复用后输出，且这2个子调制器均工作在最小偏置点。相似地，来自Ku波段的雷达参考信号和回波信号通过调制器 X_Q 和 Y_Q 调制到光载波上，这2个子调制器也工作在最小偏置点，调制后的光波经偏振复用后输出。与C波段不同的是，Ku波段的发射LFM信号，是由中频信号在光域倍频产生，且发射信号在倍频的同时在光域引入了延时。

在雷达发射机端，C波段发射机由任意波形发生器(通道-1)，中频链路，光子辅助倍频与延时器、射频链路-4和射频链路-5构成。在C波段雷达发射机端，任意波形发生器的通道-1产生一个C波段的LFM信号，该信号输入到由一系列放大器和带通滤波器构成的射频链路-1中进行功率放大，经过功率放大的C波段LFM信号被一个功分器分为两路。其中一路信号输入到C波段发射天线作为C波段雷达发射信号；另一路信号输入到调制器 X_I 作为C波段参考信号。在Ku波段发射机端，双通道任意波形发生器的通道-2产生一个中频LFM信号，中频链路用来放大该中频LFM信号的功率，经过放大的中频信号输入到光子辅助倍频与延时模块，该模块的功能是同时产生一个中心频率和带宽相对于原始中频信号4倍频之后的雷达发射信号和参考信号，并且对其中的发射信号进行延时。该光子辅助倍频与延时模块结构如图1(d)所示，它由激光器、电光调制器、光耦合器、光纤和2个光电探测器构成，中频微波信号通过电光调制器调制到光载波上，其中电光调制器工作在最大偏置点，调制之后的光信号被光耦合器分为两路，其中一路经过光电探测器生成一个4倍频的参考信号，另一路经过一段光纤延后再通过光电转换产生倍频之后的Ku波段雷达发射信号。而射频链路-4的功能是滤出4倍频之后的射频信号并将其功率进

发射机由任意波形发生器(通道-2)，中频链路，光子辅助倍频与延时器、射频链路-4和射频链路-5构成。在C波段雷达发射机端，任意波形发生器的通道-1产生一个C波段的LFM信号，该信号输入到由一系列放大器和带通滤波器构成的射频链路-1中进行功率放大，经过功率放大的C波段LFM信号被一个功分器分为两路。其中一路信号输入到C波段发射天线作为C波段雷达发射信号；另一路信号输入到调制器 X_I 作为C波段参考信号。在Ku波段发射机端，双通道任意波形发生器的通道-2产生一个中频LFM信号，中频链路用来放大该中频LFM信号的功率，经过放大的中频信号输入到光子辅助倍频与延时模块，该模块的功能是同时产生一个中心频率和带宽相对于原始中频信号4倍频之后的雷达发射信号和参考信号，并且对其中的发射信号进行延时。该光子辅助倍频与延时模块结构如图1(d)所示，它由激光器、电光调制器、光耦合器、光纤和2个光电探测器构成，中频微波信号通过电光调制器调制到光载波上，其中电光调制器工作在最大偏置点，调制之后的光信号被光耦合器分为两路，其中一路经过光电探测器生成一个4倍频的参考信号，另一路经过一段光纤延后再通过光电转换产生倍频之后的Ku波段雷达发射信号。而射频链路-4的功能是滤出4倍频之后的射频信号并将其功率进

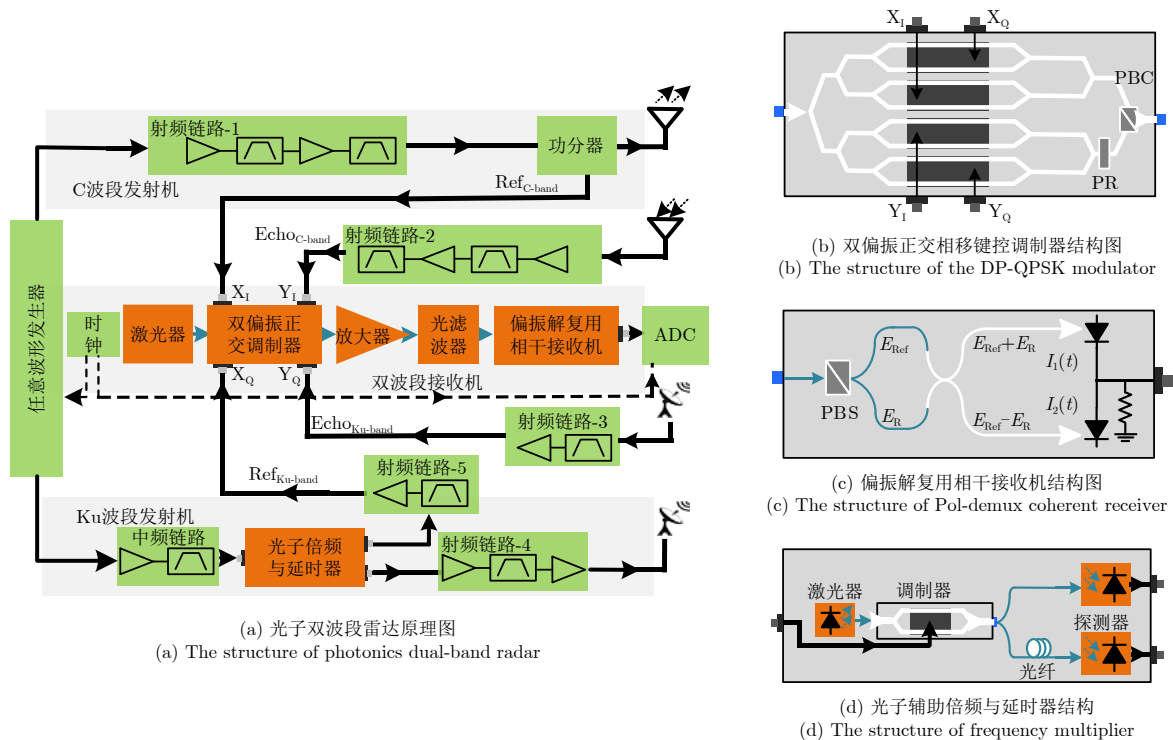


图1 基于光子辅助去调频结构的双波段连续波雷达原理图(ADC: 模数转换器; PBC: 偏振合束器; PR: 偏振旋转器; PBS: 偏振分束器)

Fig. 1 The structure of photonic-assisted dual-band radar based on stretch processing (ADC: Analog to Digital Converters; PBC/PBS: Polarization Beam Combiner/Splitter; PR: Polarization Rotator)

行放大,再输入到Ku波段传输天线作为发射信号。射频链路-5将Ku波段的参考信号放大之后,输入到调制器 X_Q 。双波段的回波信号分别由相应的接收天线进行接收,其中,射频链路-2作用是将C波段回波信号进行功率放大,放大后的C波段回波输入到调制器 Y_I ;而Ku波段的回波经过射频链路-3放大后输入到调制器 Y_Q 。

双波段雷达接收机,由1个窄线宽激光器、DP-QPSK调制器、掺铒光纤放大器、双偏振光滤波器(Dual-Polarization Optical Band Pass Filter, DP-OBPF)、偏振解复用相干接收机和ADC组成。在双波段接收机中,窄线宽激光器产生的激光输入到DP-QPSK调制器,DP-QPSK调制器的结构如图1(b)所示,它的上下两条路径均由QPSK调制器构成,其中,一条路径上的光波偏振方向被旋转 90° 。上下两路的调制信号在DP-QPSK调制器输出端经偏振复用后输出。其中,DP-QPSK调制器的4个子MZM均工作在最小偏置点,调制信号偶阶光边带都被抑制。在DP-QPSK调制器的输出端,双波段雷达的光参考信号和相应的光回波信号经过偏振复用之后输入到掺铒光纤放大器中进行功率放大,放大之后的光信号输入到可调光滤波器,光滤波器同时滤出分布在两个偏振方向上的C波段和Ku波段回波和参考信号的正1阶光边带,经过滤波后正交偏振的光信号被耦合进入偏振解复用相干接收机中进行光电探测。相干接收机的输出中频信号由ADC采样后输入到数字信号处理器中计算得到目标的位置信息。值得注意的是,双波段雷达的光参考和光回波信号通过偏振复用的方式在相同的光路中进行传输,则可以认为外界环境对参考信号和回波信号传输路径的扰动是相似的,这两路信号的相位关系可认为保持不变,因此在相干接收机的输出端得到的是一个相位稳定的中频输出信号。

假设光延迟线对Ku波段引入的时延为 τ_0 ,C波段和Ku波段雷达发射LFM信号分别为 S_{Tx_C} 和 S_{Tx_Ku} ,则双波段雷达发射信号可表示为

$$\left. \begin{aligned} S_{Tx_C} &= V_C \cos(\omega_C t + k_C \pi t^2) \\ S_{Tx_Ku} &= V_{Ku} \cos[\omega_{Ku}(t - \tau_0) + k_{Ku} \pi(t - \tau_0)^2] \end{aligned} \right\} (1)$$

其中, V_C , V_{Ku} , ω_C , ω_{Ku} , k_C 和 k_{Ku} 分别是双波段雷达发射信号的幅度、角频率和调频率。

雷达回波信号可以看作是发射LFM信号的延时,且回波信号幅度被目标的反射特性加权。这里假设在距离雷达为 r 处有一个点目标,则双波段雷达回波信号可以表示为

$$\left. \begin{aligned} S_{Rx_C} &= f_C(r) S_{Tx_C}(t - \tau) \\ S_{Rx_Ku} &= f_{Ku}(r) S_{Tx_Ku}(t - \tau) \end{aligned} \right\} (2)$$

其中, $f_C(r)$ 和 $f_{Ku}(r)$ 分别为目标在C波段和Ku波段的反射率, $\tau = 2r/c$ 为回波的时延, c 为光在空气中的传播速度。

激光器产生的光载波可记为 $A_0 \exp(j\omega_0 t)$,调制C波段雷达参考信号和回波信号的2个子MZM工作在最小偏置点,在DP-QPSK调制器的输出端,C波段的调制信号可记为

$$\left. \begin{aligned} E_{Pol-X_C} &= -\frac{\sqrt{2}}{2} A_0 \exp(j\omega_0 t) J_1(\beta_{ref_C}) \\ &\quad \cdot \left(\exp[j(\omega_C t + k_C \pi t^2)] \right. \\ &\quad \left. + \exp[-j(\omega_C t + k_C \pi t^2)] \right) \\ E_{Pol-Y_C} &= -\frac{\sqrt{2}}{2} A_0 \exp(j\omega_0 t) J_1(\beta_{echo_C}) \\ &\quad \cdot \left(\exp\{j[\omega_C(t - \tau) + k_C \pi(t - \tau)^2]\} \right. \\ &\quad \left. + \exp\{-j[\omega_C(t - \tau) + k_C \pi(t - \tau)^2]\} \right) \end{aligned} \right\} (3)$$

其中, A_0 为调制信号的幅度值,且其和输入光载波功率 P_0 之间满足关系式 $P_0 = |A_0|^2/2$, ω_0 为光载波的角频率, $J_1(x)$ 是1阶第1类贝塞尔函数, β_{ref_C} 和 β_{echo_C} 分别为C波段参考信号和回波信号的调制系数,且 $\beta_{ref_C} = \pi V_C/V_\pi$ 和 $\beta_{echo_C} = \pi f_C(r) V_C/V_\pi$ 。随后可调光滤波器滤出的C波段的调制信号正1阶光边带可表示为

$$\left. \begin{aligned} E_{Pol-X_C} &= -\frac{\sqrt{2}}{2} A_0 g \exp(j\omega_0 t) J_1(\beta_{ref_C}) \\ &\quad \cdot \left\{ \exp[-j(\omega_C t + k_C \pi t^2)] \right\} \\ E_{Pol-Y_C} &= -\frac{\sqrt{2}}{2} A_0 g \exp(j\omega_0 t) J_1(\beta_{echo_C}) \\ &\quad \cdot \left\{ \exp\{-j[\omega_C(t - \tau) + k_C \pi(t - \tau)^2]\} \right\} \end{aligned} \right\} (4)$$

其中, g 为掺铒光纤放大器的线性增益。所滤出的两个光边带在偏振解复用相干接收机中进行平衡探测,接收机的2个光电探测器所产生的带内光电流可记为

$$\begin{aligned} I_n &= R |E_{Pol-X_C} + (-1)^{n+1} E_{Pol-Y_C}|^2 \\ &= \frac{R}{2} g^2 |A_0|^2 \left(J_1(\beta_{ref_C})^2 + J_1(\beta_{echo_C})^2 \right. \\ &\quad \left. + (-1)^{n+1} 2 \times J_1(\beta_{ref_C}) J_1(\beta_{echo_C}) \right. \\ &\quad \left. \cdot \cos(2k_C \pi \tau t + \omega_C \tau - k_C \pi \tau^2) \right) \end{aligned} (5)$$

式中, $n=1, 2$, R 为光电探测器的响应度,则在相干接收机的输出端,由C波段雷达回波信号产生的去调频中频信号可表示为

$$\begin{aligned}
S_{\text{IF}_C} &= 2R |A_0|^2 g^2 J_1(\beta_{\text{ref}_C}) J_1(\beta_{\text{echo}_C}) \\
&\quad \cdot \cos(2k_C \pi \tau t + \omega_C \tau - k_C \pi \tau^2) \\
&\approx \frac{1}{2} R |A_0|^2 g^2 \beta_{\text{ref}_C} \beta_{\text{echo}_C} \\
&\quad \cdot \cos(2k_C \pi \tau t + \omega_C \tau - k_C \pi \tau^2) \quad (6)
\end{aligned}$$

同样地，用于调制Ku波段雷达参考信号和回波信号的2个子MZM工作在最小偏置点，则在DP-QPSK调制器的输出端，Ku波段的调制信号可表示为

$$\begin{aligned}
E_{\text{Pol-X}_\text{Ku}} &= -\frac{\sqrt{2}}{2} A_0 \exp(j\omega_0 t) J_1(\beta_{\text{ref}_\text{Ku}}) \\
&\quad \cdot \left\{ \exp[j(\omega_{\text{Ku}} t + k_{\text{Ku}} \pi t^2)] \right. \\
&\quad \left. + \exp[-j(\omega_{\text{Ku}} t + k_{\text{Ku}} \pi t^2)] \right\} \\
E_{\text{Pol-Y}_\text{Ku}} &= -\frac{\sqrt{2}}{2} A_0 \exp(j\omega_0 t) J_1(\beta_{\text{echo}_\text{Ku}}) \\
&\quad \cdot \left\{ \exp\left\{ j \left[\omega_{\text{Ku}} (t - \tau - \tau_0) \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + k_{\text{Ku}} \pi (t - \tau - \tau_0)^2 \right] \right\} \\
&\quad \left. + \exp\left\{ -j \left[\omega_{\text{Ku}} (t - \tau - \tau_0) \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + k_{\text{Ku}} \pi (t - \tau - \tau_0)^2 \right] \right\} \right\} \quad (7)
\end{aligned}$$

同理可以得到，Ku波段雷达回波信号产生的去调频中频信号可表示为

$$\begin{aligned}
S_{\text{IF}_\text{Ku}} &= 2R |A_0|^2 g^2 J_1(\beta_{\text{ref}_\text{Ku}}) J_1(\beta_{\text{echo}_\text{Ku}}) \\
&\quad \cdot \cos[2k_{\text{Ku}} \pi (\tau + \tau_0) t + \omega_{\text{Ku}} (\tau + \tau_0) \\
&\quad - k_{\text{Ku}} \pi (\tau + \tau_0)^2] \\
&\approx \frac{1}{2} R |A_0|^2 g^2 \beta_{\text{ref}_\text{Ku}} \beta_{\text{echo}_\text{Ku}} \\
&\quad \cdot \cos[2k_{\text{Ku}} \pi (\tau + \tau_0) t + \omega_{\text{Ku}} (\tau + \tau_0) \\
&\quad - k_{\text{Ku}} \pi (\tau + \tau_0)^2] \quad (8)
\end{aligned}$$

由式(6)和式(8)可知，C波段和Ku波段去调频得到的中频信号的频率分别是 $k_C \tau$ 和 $k_{\text{Ku}} (\tau + \tau_0)$ ，

它们都是一个与目标距离相关的频率，因此可以通过进一步的数字信号处理恢复得到目标的位置信息。这里首先将Ku波段的发射信号加上一个延时量 τ_0 ，通过调节延时量的大小，能够使得Ku波段和C波段去调频后得到的中频信号在频域上分离，从而避免相互干扰，因此能用同一套雷达接收机接收双带雷达回波信号。

3 实验结果与分析

接着本文对微波光子双波段雷达进行了实验验证。C波段LFM信号由任意波形发生器(Keysight M8190A)的通道-1直接产生，它是一个中心频率为5.5 GHz，带宽为1 GHz，脉冲重复周期为50 μs 的LFM连续波信号。Ku波段发射LFM信号由一个中频LFM信号在光域倍频产生，该中频LFM信号由任意波形发生器通道-2产生，它是一个中心频率为3.75 GHz，带宽为0.5 GHz，脉冲重复周期为50 μs 的LFM连续波信号。该中频信号输入到光子辅助倍频与延时器，产生的Ku波段LFM信号脉冲重复周期与倍频前的中频LFM信号一致，其中心频率为15 GHz，带宽为2 GHz，实验中，光子倍频与延时模块中使用的延时光纤长度为150 m，延时后的发射信号经过放大后输入到Ku波段发射天线，射频链路-4的增益系数为35 dB。按照雷达距离分辨率计算公式 $c/2B$ ，其中 B 为雷达发射信号带宽，C波段和Ku波段的理论距离分辨率分别为15.0 cm和7.5 cm。实验中，C波段信号发射功率为8.6 dBm，Ku波段的发射功率为15.8 dBm，发射LFM信号频率谱如图2所示。在接收机端，接收机由激光器，DP-QPSK调制器，放大器，滤波器和偏振解复用相干接收机(discovery semiconductors)构成。采用的窄线宽激光器(teraxion)的波长为1550.14 nm，功率为17.6 dBm。来自于激光器的光波被输入到DP-QPSK调制器(Fujitsu FTM7977HQA)中作为

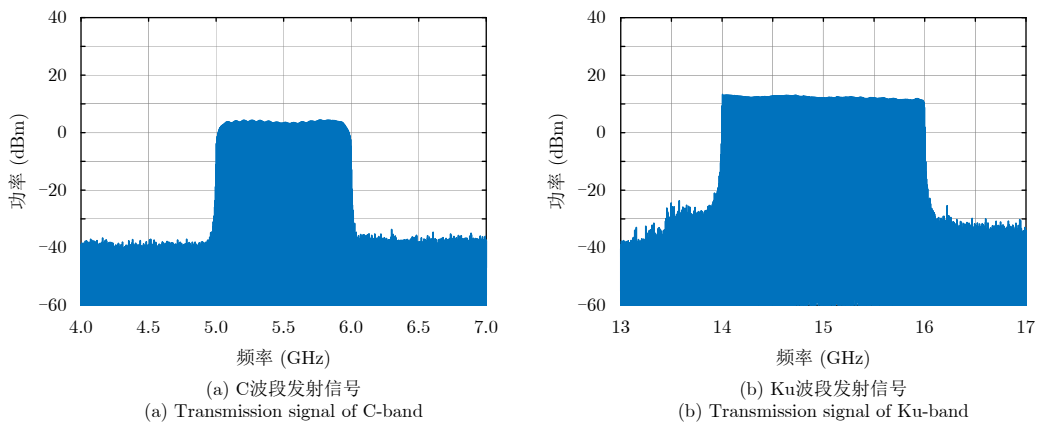


图2 双波段发射线性调频信号的频谱

Fig. 2 The spectrum of transmitted signals

光载波。在实验中, DP-QPSK调制器的4个子MZM都工作在最小偏置点。光滤波器用来滤出双波段雷达光参考信号和光回波信号的正1阶光边带, 图3所示为C波段和Ku波段调制信号以及经过光滤波器后的光谱, 需要注意的是每一条光谱曲线都是两个偏振方向光波的叠加。滤波后的调制信号输入到偏振解复用相干接收机中进行光子辅助去调频处理。其中, 偏振解复用相干接收机是一个由偏振波束分束器, 平衡探测器和光路匹配的3 dB耦合器构成的集成模块单元。相干接收机输出的去调频中频信号由采样速率为100 MSa/s的ADC采集记录, 量化后的信号输入到数字信号处理器中进行信号处理以恢复目标的距离和多普勒频率等信息。其中雷达接收机混频器的变频增益为-22 dB, 混频器噪声系数约为33 dB。

为了验证所提出的光子辅助双波段雷达系统, 本文采用一对边长为15 cm的三面角反射器作为目标,

对系统进行了一系列的转台成像实验。实验中, C波段收发天线之间距离约为1.05 m, Ku波段天线之间的距离约为1 m, 目标至天线中心的距离约为7.5 m, 并且转台的旋转平面与波束远场等相位面垂直。首先, 将两个角反射器在距离向摆放相差约为35 cm, 对这两个角反射器进行距离测量。相干接收机输出的C波段和Ku波段去调频中频信号频谱如图4所示, 可以看到, 在C波段和Ku波段均能观察到对应于两个目标的两个频率峰值。在C波段两个频率峰相差43 kHz, 对应于测量距离32.25 cm, 而在Ku波段两个频率峰相差92 kHz, 对应于距离测量结果为34.5 cm。随后, 将两个角反射器放置在转台上进行动目标成像实验, 转台转速为 $(\pi/9)$ rad/s, 两个角反射器的初始位置为距离向相差45 cm, 方位向相差50 cm, 成像积分时间为0.4 s。双波段雷达成像结果如图5所示, C波段成像结果表明两目标在方位向和距离向测量距离分别为46.4 cm和48.8 cm, 而在

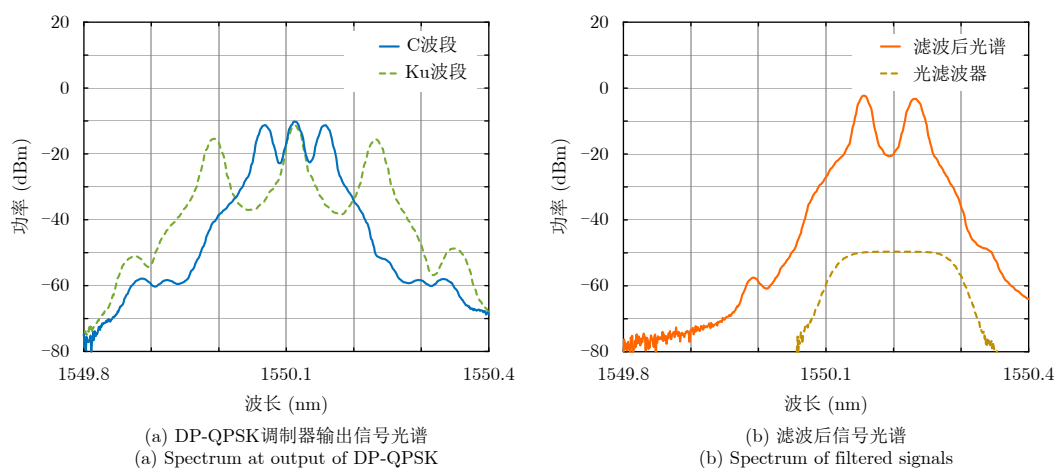


图 3 双波段雷达信号光谱

Fig. 3 The optical spectra of the signals

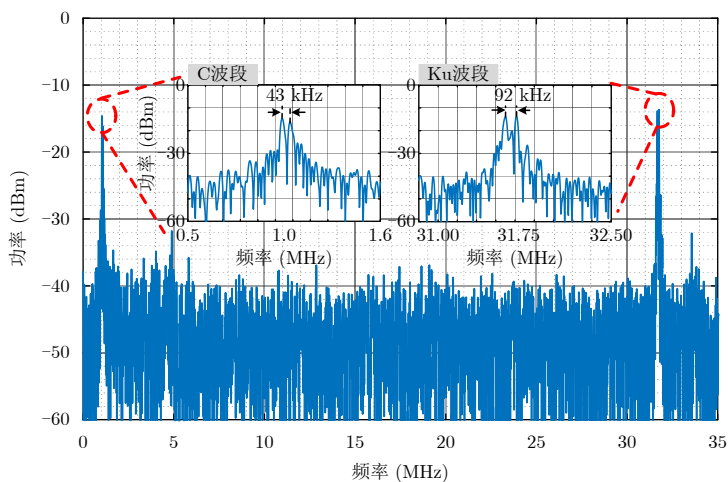


图 4 相干接收机输出信号频谱

Fig. 4 The spectra of the signals at output of the coherent receiver

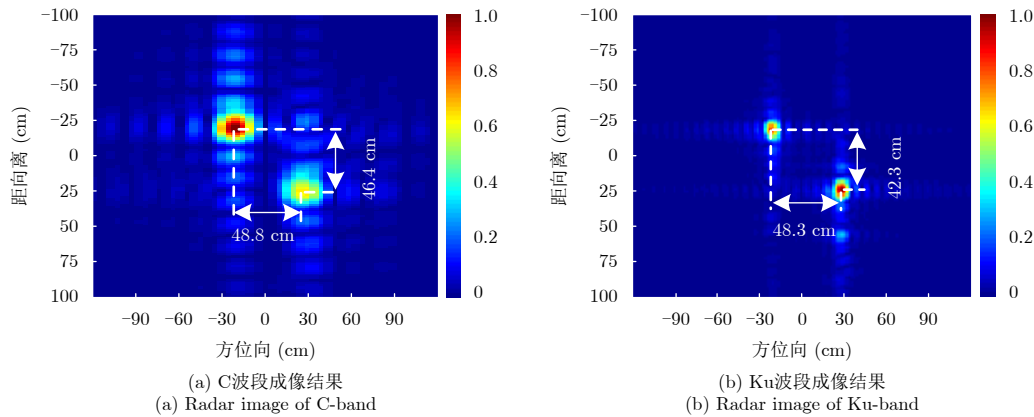


图5 双角反转台成像结果

Fig. 5 Radar images of a pair of rotating TCrs

Ku波段的测量结果分别为42.3 cm和48.3 cm, 成像结果表明双波段雷达在C波段和Ku波段都能够正确地恢复目标的位置信息。本文所提出的光子辅助双波段雷达系统适合对目标跟踪时进行高分辨率成像。

4 结论

本文提出并验证了一种新的光子辅助双波段去调频雷达系统方案, 综合分析了该方案的工作原理, 并对提出的系统进行了实验验证。所提出的光子辅助双波段雷达系统, 共享一套接收机硬件, 能够在C波段和Ku波段同时独立工作, 为减小双带雷达的体积, 重量和功耗提供了一套有效方案。本工作展示了微波光子技术在多波段雷达系统中的潜力。

参考文献

- [1] 张群, 胡健, 罗迎, 等. 微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 531–547. doi: [10.12000/JR18049](https://doi.org/10.12000/JR18049).
ZHANG Qun, HU Jian, LUO Ying, *et al.* Research progresses in radar feature extraction, imaging, and recognition of target with micro-motions[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(5): 531–547. doi: [10.12000/JR18049](https://doi.org/10.12000/JR18049).
- [2] 李彦兵, 杜兰, 刘宏伟, 等. 基于微多普勒特征的地面目标分类[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2848–2853. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00128](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00128).
LI Yanbing, DU Lan, LIU Hongwei, *et al.* Ground targets classification based on micro-doppler effect[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2848–2853. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00128](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00128).
- [3] MELVIN W L and SCHEER J A. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques[M]. Edison, NJ, Scitech Publishing, 2012. doi: [10.1049/SBRA020E](https://doi.org/10.1049/SBRA020E).
- [4] 曹思扬, 郑元芳. 雷达波形研究发展现状与趋势(英文)[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 603–621. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14044](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14044).
CAO Siyang and ZHENG Yuanfang. Recent developments in radar waveforms[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 603–621. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14044](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14044). (本条文献为中文文献, 请核对)
- [5] 李堃, 梁兴东, 陈龙永, 等. 基于LFMCW体制的分布式SAR高分辨率成像方法研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(2): 437–443. doi: [10.11999/JEIT160274](https://doi.org/10.11999/JEIT160274).
LI Kun, LIANG Xingdong, CHEN Longyong, *et al.* Signal model and high-resolution imaging approach for distributed SAR based on LFMCW signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(2): 437–443. doi: [10.11999/JEIT160274](https://doi.org/10.11999/JEIT160274).
- [6] CAPUTI W J. Stretch: A time-transformation technique[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, AES-7(2): 269–278. doi: [10.1109/TAES.1971.310366](https://doi.org/10.1109/TAES.1971.310366).
- [7] ZHOU Zhengshu, CACCETTA P, SIMS N C, *et al.* Multiband SAR data for rangeland pasture monitoring[C]. Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 170–173. doi: [10.1109/IGARSS.2016.7729035](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729035).
- [8] TRIZNA D B, BACHMANN C, SLETTEN M, *et al.* Projection pursuit classification of multiband polarimetric SAR land images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2380–2386. doi: [10.1109/36.964974](https://doi.org/10.1109/36.964974).
- [9] LI Ruoming, LI Wangzhe, DING Manlai, *et al.* Demonstration of a microwave photonic synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and stretch processing[J]. *Optical Express*, 2017, 25(13): 14334–14340. doi: [10.1364/OE.25.014334](https://doi.org/10.1364/OE.25.014334).
- [10] ZHANG Fangzheng, GUO Qingshui, WANG Ziqian, *et al.* Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging[J]. *Optics*

- Express*, 2017, 25(14): 16274–16281. doi: [10.1364/OE.25.016274](https://doi.org/10.1364/OE.25.016274).
- [11] ZHANG Fangzheng, GAO Bindong, and PAN Shilong. Photonics-based MIMO radar with high-resolution and fast detection capability[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17529–17540. doi: [10.1364/OE.26.017529](https://doi.org/10.1364/OE.26.017529).
- [12] ZOU Weiwen, ZHANG Hao, LONG Xin, *et al.* All-optical central-frequency-programmable and bandwidth-tailorable radar[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19786. doi: [10.1038/srep19786](https://doi.org/10.1038/srep19786).
- [13] SCOTTI F, LAGHEZZA F, and BOGONI A. Pandora: Single unit fully coherent S and X band software defined radar[C]. Proceedings of the 16th International Radar Symposium, Dresden, Germany, 2015: 446–450. doi: [10.1109/IRS.2015.7226243](https://doi.org/10.1109/IRS.2015.7226243).
- [14] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, *et al.* A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341–345. doi: [10.1038/nature13078](https://doi.org/10.1038/nature13078).
- [15] MENG Ziyi, LI Jianqiang, YIN Chunjing, *et al.* Dual-band dechirping LFM CW radar receiver with high image rejection using microwave photonic I/Q mixer[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 22055–22065. doi: [10.1364/OE.25.022055](https://doi.org/10.1364/OE.25.022055).
- [16] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, *et al.* Photonics for radars operating on multiple coherent bands[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 500–507. doi: [10.1109/JLT.2015.2482390](https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2482390).
- [17] LI Ruoming, DING Manlai, WEN Zhilei, *et al.* A photonic receiver based on stretch processing for synthetic aperture radar[C]. Proceedings of 2017 IEEE Photonics Conference,



曹继明(1994–), 男, 安徽人, 中国科学院电子学研究所读硕士研究生, 主要研究方向为光子混频器及其在双带雷达方面的应用。

E-mail: caojiming16@mails.ucas.ac.cn



杨继尧(1992–), 男, 山西人, 中国科学院电子学研究所读博士研究生, 主要研究方向为光子信道化技术及其在雷达信号处理中的应用。

E-mail: yangjiyao16@mails.ucas.ac.cn



孙 强(1994–), 男, 河北人, 中国科学院电子学研究所读博士研究生, 主要研究方向为基于微波光子学的信号产生技术。

E-mail: sunqiang17@mails.ucas.ac.cn



李王哲(1983–), 男, 安徽人, 加拿大渥太华大学博士, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 研究方向为基于光子技术的合成孔径雷达、微波光子模块芯片集成等。

E-mail: wzli@mail.ie.ac.cn

Orlando, USA, 2017: 677–678. doi: [10.1109/IPCon.2017.](https://doi.org/10.1109/IPCon.2017.8116279)

[8116279](https://doi.org/10.1109/IPCon.2017.8116279).

作者简介