

基于光纤链路传输的远程超宽带混沌成像雷达

王文珂^{1,2} 刘 丽^{1,2} 张建国^{1,2} 李静霞^{1,2} 王冰洁^{1,2}

¹太原理工大学新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室, 山西 太原 030024

²太原理工大学物理与光电工程学院光电工程研究所, 山西 太原 030024

摘要 提出了一种基于光纤链路传输的远程超宽带混沌成像雷达系统。该系统包括中心站、光纤传输链路和基站。在中心站,改进型Colpitts振荡器产生超宽带混沌信号,经上变频后作为雷达探测信号。探测信号通过激光器的外调制技术转换为相应的光信号,经光纤链路传输到基站并转换为相应电信号,由宽带天线发射。目标物反射的回波信号经光电转换和下变频在中心站被采集。利用相关运算和后向投影算法,中心站可实现对目标物的二维空间成像。实验结果表明,该系统经过10 km光纤传输后可对单个和多个目标物进行远程成像。成像的距离分辨率和方位分辨率分别为6 cm和8 cm。

关键词 遥感;超宽带混沌雷达;远程成像;相关算法;后向投影算法;Colpitts振荡器

中图分类号 TN959.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0114003

Ultra-Wideband Remote Chaotic Imaging Radar over Fiber Links

Wang Wenke^{1,2} Liu Li^{1,2} Zhang Jianguo^{1,2} Li Jingxia^{1,2} Wang Bingjie^{1,2}

¹Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

²Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract A remote imaging radar system based on ultra-wideband chaotic signal generation and radio over fiber is proposed and demonstrated experimentally. The radar system consists of a central station, optical fiber links and a base station. At the central station, an ultra-wideband chaotic signal is generated by an improved Colpitts oscillator and then is up-converted as a probe signal. The probe signal is converted into an optical signal by using the external modulation technique of laser diode. Optical fiber links are used to transport optical signals to the remote base station or back to the central station. At the base station, the optical signal is transformed into the microwave signal and then transmitted by a horn antenna. At the receiving end, the echo signal from a target is converted to be in optical domain and then transported to the central station, where it is collected after optical-to-electrical conversion and down conversion. The target imaging is obtained by utilizing the correlation method and back projection algorithm. Experimental results show that the proposed radar system can achieve remote imaging for single and multiple free-space targets with a distance of 10 km. The range resolution of 6 cm and the azimuth resolution of 8 cm are obtained, respectively.

Key words remote sensing; ultra-wideband chaotic radar; remote imaging; correlation method; back projection algorithm; Colpitts oscillator

OCIS codes 280.5600; 060.2350; 100.3008

收稿日期: 2015-08-18; 收到修改稿日期: 2015-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(61240017)、国家自然科学基金青年科学基金(51404165, 61401299)、山西省自然科学基金(2013011019-3)、教育部博士点新教师类基金(20121402120019)、太原理工大学新增团队成员项目(2014TD065)

作者简介: 王文珂(1990—),男,硕士研究生,主要从事混沌雷达实验研究。E-mail: wangwenke5700@163.com

导师简介: 刘 丽(1982—),女,博士,讲师,主要从事超宽带混沌雷达成像理论与方法研究。

E-mail: liu_li82@163.com(通信联系人)

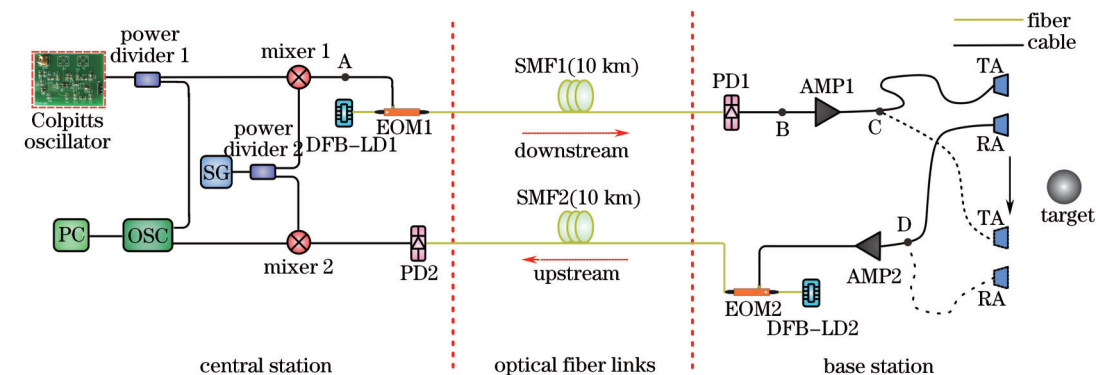
1 引 言

超宽带(UWB)随机信号雷达结合了UWB技术和随机信号雷达的优势,如高距离分辨率、良好的穿透性能、低截获率和强抗干扰能力^[1]。因此,UWB随机信号雷达被广泛用于精准定位^[2]、穿墙雷达成像^[3-4]、穿透叶簇进行合成孔径成像^[5]等方面。UWB随机信号雷达最简单的实现方式是不经过调频、调幅和调相等复杂调制技术,直接将一个连续的UWB随机信号作为雷达探测信号。按照探测信号的类型,UWB随机信号雷达可大致分为三类:UWB M序列雷达^[6-7]、UWB噪声雷达^[3,8-9]和UWB混沌雷达^[2,10-13]。UWB M序列雷达具有低波峰因子,对信号采集系统的动态范围要求低,并可通过欠采样实现信号重构^[7]。但是想获得较高的距离分辨率,需要昂贵的高速M序列发生器,且无模糊的探测范围受限与M序列的周期性。UWB噪声雷达的探测信号由热噪声^[3]或者自发辐射噪声^[8]经多级放大后产生,但噪声源本身产生的噪声幅值小,且高增益放大器的带宽有限,因此获得高功率的UWB噪声信号仍然是困难的^[14]。相比以上两种UWB随机信号雷达,混沌雷达利用简单的非线性动力系统,如Colpitts振荡器^[15-16]或者外部扰动下的半导体激光器^[17-20],获得宽带、大幅度且无码长限制的混沌信号,将其作为雷达探测信号实现高距离分辨率和无模糊探测。此外,混沌信号的可控性和对初值的敏感性,有利于实现不同系统间同步和多用户同时测量^[21-22]。2004年,Lin等^[2]提出利用光注入半导体激光器产生的混沌激光经光电转换后作为雷达发射信号,并获得了9 cm的距离分辨率。2010年Jiang等^[10-11]提出了基于Colpitts振荡器的混沌雷达系统,并研究了混沌信号在雷达系统中的性能。

然而,通过无线或者电缆传输,UWB雷达信号仅能够传输几米或几十米,限制了其在雪山、孤岛和燃料存储仓等恶劣环境下对目标的远程探测。为了扩大雷达信号的覆盖范围,可将具有低损耗、高带宽特性的光纤作为UWB雷达信号的传输介质,从而实现信号的远距离传输^[23-24]。因此,2014年Zhang等^[12-13]提出基于光载无线通信技术的远程混沌测距雷达,实现了对目标的超远距离探测。但是,上述远程混沌雷达仅实现了目标一维距离的探测。目前,关于远程UWB混沌成像雷达尚未有文献报道,而目标二维空间成像在雷达应用中更具有实际意义。因此,本文提出了一种基于光纤链路传输的远程UWB混沌成像雷达系统。该系统具有如下特点:1)利用改进型Colpitts振荡器产生混沌探测信号,相比于由分离的光学器件构成的混沌激光光源,结构更简单,受外界干扰小,更稳定;2)利用一对定向天线进行扫描,并结合相关运算和后向投影算法,可实现目标物的二维空间成像;3)利用两路10 km长的单模光纤实现探测信号和回波信号在中心站和基站之间的远程传输。

2 实验装置

图1为本文所提出的基于光纤链路传输的远程UWB混沌成像雷达系统的实验装置图。该雷达系统由中心站、光纤传输链路和基站三部分组成。中心站实现UWB混沌信号的产生和上变频,以及回波信号的下变频和信号处理。在基站,一对定向喇叭天线实现雷达信号的发射与接收,收发天线沿同一方向水平移动,对目标进行扫描成像。同时,探测信号和回波信号在中心站和基站进行光电转换后,再通过光纤进行远距离传输。



DFB-LD: distributed-feedback laser diode; SMF: single mode fiber; PD: photodetector
 AMP: amplifier; TA: transmitting antenna; RA: receiving antenna; SG: signal generation
 OSC: oscilloscope; PC: personal computer; EOM: electro-optic modulator

图1 基于光纤链路传输的远程UWB混沌成像雷达系统的实验装置

Fig.1 Experimental setup of ultra-wideband remote chaotic imaging radar over fiber links

在中心站,改进型 Colpitts 振荡器产生 UWB 混沌信号,通过功分器 1(A-INFOMW GF-T2-20-3000)分为两路:一路作为参考信号,由示波器(OSC, LeCroy SDA 725Zi)直接采集;另一路经混频器 1(Marki M2-0026)上变频后作为雷达探测信号。混频器所需的本振信号(LO)是由信号发生器(SG, CETC AV1487A)产生的正弦信号提供。利用电光调制器 1(EOM1, EOSPACE AZ-DK5-20-PKU-SFU-LV-SRF1W)对分布反馈激光器 1(DFB-LD1)进行外调制,将上变频后的 UWB 混沌探测信号转换为相应的光信号。光信号通过 10 km 单模光纤 1(SMF1, YOFC G652D)传输到基站,然后通过宽带光电探测器 1(PD1, CONQUER KG-PT-10G-A-SM-FA)转换为相应的电信号。电信号经放大器 1(AMP1, CONQUER KG-RF-10)放大,通过定向天线(TA, A-INFO LB-10180)发射。目标物反射形成的回波信号由另一个相同结构的定向天线(RA, A-INFO LB-10180)接收,经 AMP2 放大,再通过 DFB-LD2 的外调制转换为光信号并通过 10 km 的 SMF2 传输回中心站。远距离传输后的回波信号经 PD2 转换为相应的电信号,再经混频器 2(Marki M2-0026)下变频后由示波器采集。计算机实现数据处理和图像显示。表 1 为实验中所用仪器的典型参数。

表 1 实验中所用仪器的典型参数

Table 1 Typical parameters of the devices used in our experiment

Elements	Bandwidth / Pass band	Other parameters
Power divider 1	0.02~3 GHz	
Power divider 2	1~18 GHz	
Mixers	LO & RF: 0.01~26 GHz IF: 0.001~6 GHz	
OSC	2 GHz	Sampling rate: 10 GS/s Bias current: 33 mA
DFB-LDs		Central wavelength: 1552 nm Output power: 1 mW
EOMs	20 GHz	
PDs	9.5 GHz	Conversion efficiency: 742 V/W
AMPs	75 Hz~10 GHz	Max gain: 25 dB Regulation accuracy: 0.5 dB
TA/RA	1~18 GHz	Gain: 11 dB

3 成像算法

远程混沌雷达成像算法可借鉴成熟的 UWB 噪声雷达的成像算法^[25]。假设接收和发射天线之间的间距一定,同时沿直线移动 M 个位置形成 M 元阵列。在每一个位置处,对回波信号和参考信号作互相关运算,再进行后向投影(BP)算法,即可实现对目标物的二维成像。

远程混沌雷达成像算法如下所示:假设 $s(t)$ 表示参考信号, $r(t)$ 表示回波信号,将二者进行互相关运算,则互相关函数 $g(\tau)$ 可表示为

$$g(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} r(t) s^*(t - \tau) dt, \quad (1)$$

其中 T 表示互相关的积分时间; $s^*(t)$ 为 $s(t)$ 的复共轭; τ 表示回波信号相对参考信号的延迟时间。需要注意的是 $g(\tau)$ 需要被标记零点,即 τ 需要减去信号在雷达系统中的传输时间,可通过天线对接的方法,测得信号在雷达系统中的传输时间。

利用上述相关运算获得 M 个位置处的互相关函数 $g_m(t) (1 \leq m \leq M)$ 后,进行希尔伯特变换得到复信号 $G_m(t)$:

$$G_m(t) = g_m(t) + jH[g_m(t)]. \quad (2)$$

将目标成像区域划分成多个像素点,任意像素点 q 的信号 $r_q(t)$ 是各复信号在不同延迟时间的采样信号的叠加,即

$$r_q(t) = \sum_{m=1}^M |G_m(t)| \delta(t - 2R_{mq}/c), \quad (3)$$

其中 $| \cdot |$ 表示取幅运算; R_{mq} 表示像素点 q 与第 m 个收/发天线间的距离,可以通过两点的坐标计算而得; c 表示电磁波在自由空间中传播速度,即 3.0×10^8 m/s。如果目标位于像素点 q 处,则该点的能量在 M 次测量中得到加强,目标能量在像素点 q 实现聚焦, q 点即为目标成像位置。反之,该点的能量会很弱,在图像中可视为背景。

4 实验结果

4.1 混沌信号的产生和传输特性

相比于标准型 Colpitts 振荡器,本文所使用的改进型 Colpitts 振荡器将电感从三极管的集电极移至基极,并串联一个电阻,消除了高频时三极管集电极通过集电极-基极之间的寄生电容对地短接的影响,从而获得更高的带宽以及更低的旁瓣水平信号^[16]。图2为改进型 Colpitts 振荡器产生的 UWB 混沌信号的时序、功率谱和自相关曲线。图2(a)为采集时间为 10 μ s 的混沌信号的时序图。从图中可知,混沌信号在时序上呈现不规则的类噪声特性。信号的峰峰值和平均功率(由型号为 R&S NRP-Z22 的平均功率传感器测得)分别是 280 mV 和 -12.2 dBm。图2(b)为混沌信号的功率谱。混沌信号的带宽为 970 MHz(文中混沌带宽的计算方法是:设 $r = \int_0^B P df / \int_0^\infty P df$,其中 f 为频率, P 为功率,当 $r=80\%$ 时,所对应的频率值为混沌带宽^[26]),具有宽频带的特征。从图2(c)可以看出,混沌信号的自相关曲线呈现类似 δ 函数的形状,其半峰全宽(FWHM, f_{FWHM})为 0.4 ns(见插图),为实现厘米级的距离分辨率提供保障。

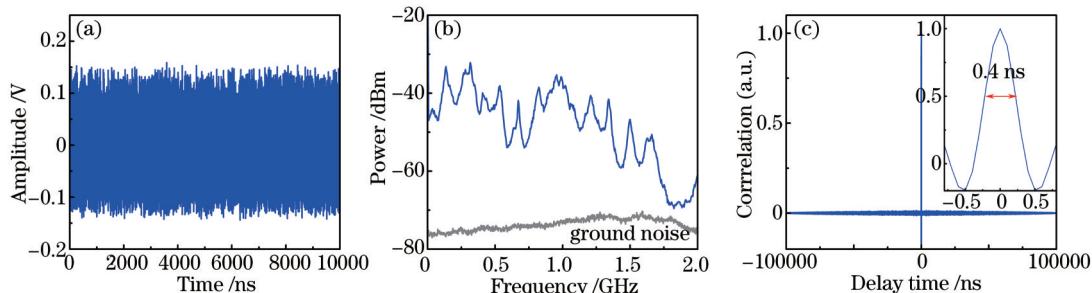


图2 混沌信号的特性。(a) 时序; (b) 功率谱; (c) 自相关曲线

Fig.2 Properties of the chaotic signal. (a) Temporal waveform; (b) power spectrum; (c) autocorrelation trace

为阐明混沌信号在雷达系统和空间中的传输特性,图3给出了图1标记的4个节点A~D的信号功率

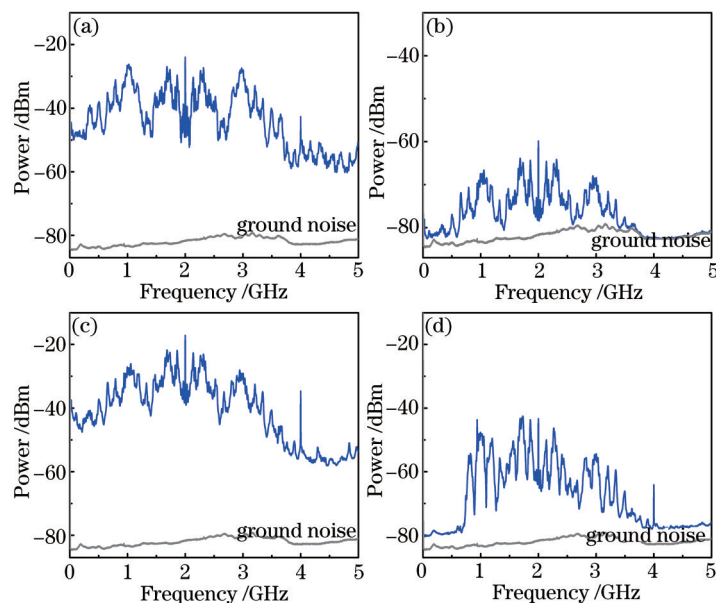


图3 系统中不同位置处的信号功率谱。(a) 上变频的混沌信号; (b) 经 10 km 光纤传输后的信号; (c) 发射天线发射的探测信号; (d) 接收天线接收到的回波信号

Fig.3 Power spectra of different points in the system. The power spectrum characteristics of (a) up-converted chaotic signal; (b) chaotic signal after 10 km fiber transmission; (c) probe signal launched by TA; (d) echo signal received by RA

谱。图 3(a)为上变频后的混沌信号功率谱,变频所用的本振信号中心频率为 2 GHz。由于发射信号的频率越高,衰减越大,但频率越低,喇叭天线的尺寸越大,所以综合考虑天线尺寸和信号衰减程度,将本振信号的中心频率设为 2 GHz。图 3(b)为混沌信号转换为相应的光信号再经 10 km 光纤传输后的功率谱。从图中可以看出,虽然能量有所下降,但受益于单模光纤的低色散特性,混沌光信号经过 10 km 光纤之后,仍保持宽频带的特性。图 3(c)为天线发射的混沌探测信号功率谱,与图 3(a)比较,天线的发射信号保持原始探测信号的宽频带和高能量特性,说明本文所提出的雷达系统能够实现远程探测。图 3(d)为接收天线接收到的回波信号的功率谱。由于收发天线的响应频率范围是 1~18 GHz,因此,回波信号从直流到 1 GHz 附近的能量被滤掉。图 3(d)显示,电磁波在空间传播频率越高,损耗越大,接收天线接收的能量就减少。

此外,实验分析了 UWB 混沌光信号的相关性和峰值旁瓣水平(PSL)随光纤传输距离增加的变化情况。图 4 为测量光纤传输距离对混沌信号相关性、PSL 影响的实验装置图。Colpitts 振荡器产生的 UWB 混沌信号,经上变频后由功分器分两路:一路作为参考信号,另外一路通过电光调制器对分布反馈激光器进行外部调制,将混沌电信号转换成相应光信号,经不同长度的单模光纤传输,再通过光电探测器转换成电信号。两路信号最终由示波器采集,并进行互相关运算。

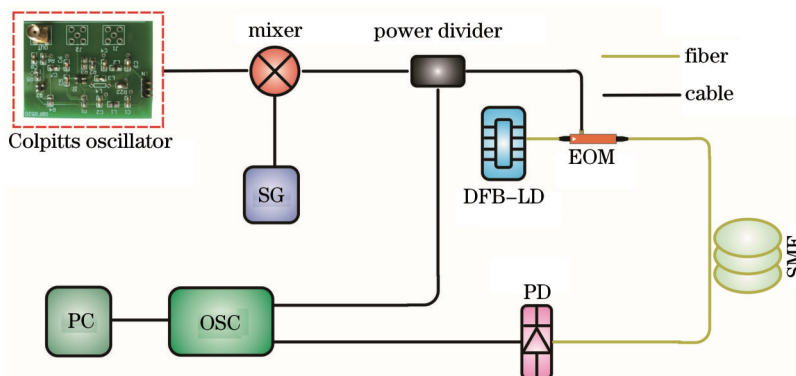


图 4 测量光纤传输距离对混沌探测信号相关性、PSL 影响的实验装置图

Fig.4 Experimental setup for measuring the effect of the fiber transmission distance of chaotic probe signal on its correlation property and PSL

图 5 为光纤传输距离与互相关峰值、PSL 的关系曲线。实验选取了不同长度的单模光纤进行混沌光信号的传输。从图 5 可知,随着传输距离的增加,互相关峰值逐渐减少。插图(a)表示经 0.5 m 长光纤传输后得到的互相关曲线,插图(b)表示经约 10 km 长光纤传输后得到的互相关曲线。从图 5 红色曲线可知,随着光纤传输距离的增加,互相关峰值呈指数规律逐渐减少。从图 5 蓝色曲线可知,随着光纤传输距离的增加,PSL 变化不明显,保持在一定范围内。当互相关峰值下降一半时,光纤传输距离对应约 10 km,PSL 无明显变化,表明混沌光信号经过约为 10 km 的光纤传输,仍保持了良好的相关特性。因此,本文所提出的雷达系统将光纤的远程传输距离设为 10 km。

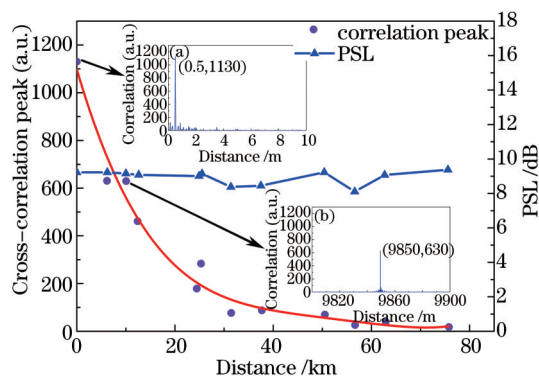


图 5 光纤传输距离与互相关峰值、PSL 的关系曲线图

Fig.5 Relation curves between fiber transmission distance and cross-correlation peak, PSL

4.2 单目标成像

图 6(a)是单目标的成像场景图。室内空间为 3.5 m×3.5 m,金属球的半径为 0.14 m,其中心坐标为 (1.6,1.6) m。发射天线和接收天线间距固定为 0.2 m,分别延 X 轴、Y 轴方向同时进行平移扫描,移动间隔为 0.05 m,移动总距离为 3.5 m。由于天线间的直接耦合会引入较强的串扰杂波,故采用背景相减技术^[27]实现杂波抑制。图 6(b)是通过 BP 成像和阈值处理后的单个金属球的成像图。图中金属球的位置与实验场景图中的实际位置基本一致。

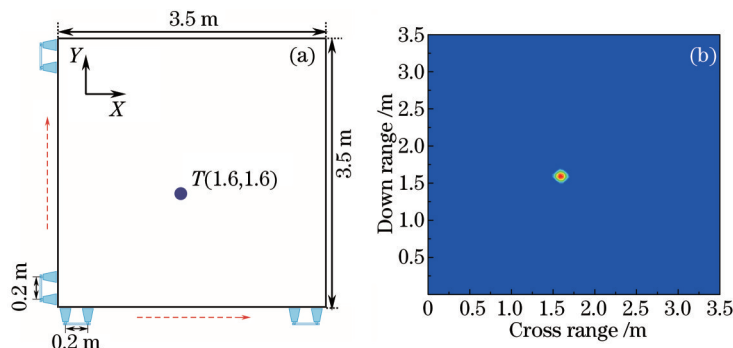


图 6 单个金属球的(a)实验场景和(b)成像结果

Fig.6 (a) Scene layout and (b) imaging result for one metal sphere

4.3 双目标成像

为了证明该雷达系统能够对多目标进行探测,在实验中放置了两个金属球进行扫描成像。图 7(a)为双目标实验场景图。室内空间仍为 3.5 m×3.5 m,两个金属球大小相同,半径均为 0.14 m。金属球中心所在位置的坐标分别为(1.1,1.1) m、(1.5,1.5) m。扫描方式和数据处理方法与单目标成像相同。图 7(b)为经过 BP 成像和阈值处理之后的成像结果图。从成像结果可以看出,经 BP 算法和阈值处理后,两个金属球的位置与空间中的实际位置相一致。

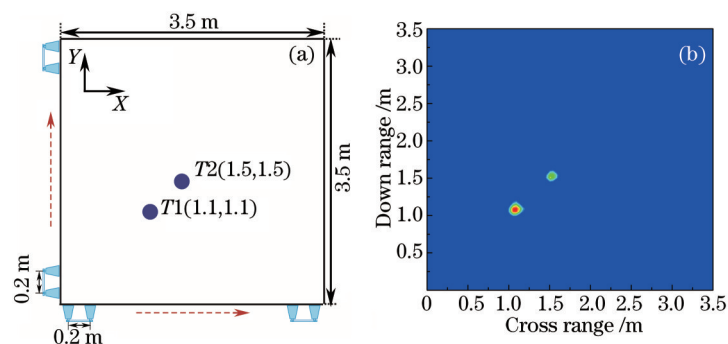


图 7 两个金属球的(a)实验场景和(b)成像结果

Fig.7 (a) Scene layout and (b) imaging result for two metal spheres

5 讨 论

距离分辨率和方位分辨率分别由自相关曲线的 FWHM 和天线孔径决定。相关峰的 FWHM 越窄,距离分辨率越高。由维纳-辛钦定理知:信号的自相关函数与其功率谱互为傅里叶变换。因此,混沌信号自相关曲线的 FWHM 主要由信号带宽决定,即混沌信号的带宽越宽,其自相关曲线的 FWHM 越窄,距离分辨率越高。图 2(c)中的插图显示混沌信号的 FWHM 为 0.4 ns,距离分辨率由公式 $f_{\text{FWHM}} \cdot c/2$ 可知为 6 cm。对于成像雷达,方位分辨率由天线孔径大小决定,天线孔径越小,方位分辨率越高。实验所用的天线孔径 D 为 16 cm,方位分辨率由公式 $D/2$ ^[28]可知为 8 cm。因此,本文所提出的 UWB 混沌成像雷达系统距离分辨率和方位分辨率分别为 6 cm 和 8 cm。

本文所采用的宽带混沌信号可以通过调节混频器的本振信号频率,使混沌信号的功率谱实现频谱搬移。图 8 为本振频率分别在 5,6,7,8 GHz 时发射信号的功率谱。从图 8 可知,本文提出的雷达可根据实时环

境,对探测信号功率谱进行调节,避免由于频谱重叠所导致的干扰。此外,本文所提出的实验方案还可以进一步简化,在光纤链路两端采用相同参数的阵列波导光栅(AWG),并设置DFB-LD1和DFB-LD2的中心波长分别对应AWG的两个通道波长,利用波分复用技术实现信号在单根光纤链路上的双向传输。

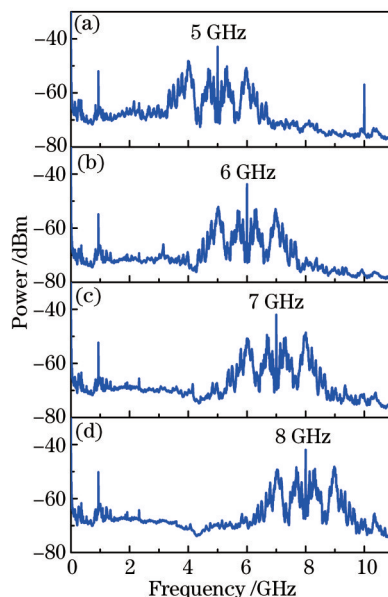


图8 当本振信号频率为(a) 5 GHz、(b) 6 GHz、(c) 7 GHz和(d) 8 GHz时探测信号的功率谱

Fig.8 Power spectra of chaotic probe signal, when the LO frequencies are set to (a) 5 GHz、(b) 6 GHz、(c) 7 GHz and (d) 8 GHz

6 结 论

综上所述,本文提出并实验验证了一种基于光纤链路传输的远程UWB混沌成像雷达系统。利用改进型Colpitts振荡器产生的UWB混沌信号作为雷达探测信号,不仅结构简单,易于集成,而且可以保证厘米量级的距离分辨率。此外,实验结果表明,结合扫描成像、BP算法和光载无线电技术,该系统在经过10 km光纤传输后可对单、双目标实现远程成像。成像的距离分辨率和方位分辨率分别为6 cm和8 cm。相比传统成像雷达,本文提出的雷达系统,为雪山、孤岛和存储燃料仓等恶劣环境中的目标探测提供了一种新的技术手段和方法。

参 考 文 献

- 1 Sun Hongbo, Lu Yilong, Liu Guosui. Ultra-wideband technology and random signal radar: An ideal combination[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2003, 18(11): 3-7.
- 2 Lin Fanyi, Liu Jiaming. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(6): 815-820.
- 3 Narayanan Ram M. Through-wall radar imaging using UWB noise waveforms[J]. Journal of the Franklin Institute, 2008, 345(6): 659-678.
- 4 Lai Chienping, Narayanan Ram M. Ultra-wideband random noise radar design for through-wall surveillance[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1716-1730.
- 5 Xu Xiaojian, Narayanan Ram M. FOPEN SAR imaging using UWB step-frequency and random noise waveforms[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(4): 1287-1300.
- 6 Sachs J, Peyerl P, Zetik R, *et al.* M-sequence ultra-wideband-radar: State of development and applications[C]. IEEE Proceedings of the International Radar Conference, 2003: 224-229.
- 7 Aftanas Michal, Zaikov Egor, Drutarovsky Milos, *et al.* Throughwall imaging of the objects scanned by M-sequence UWB radar system [C]. IEEE 18th International Conference Radioelektronika, 2008: 1-4.
- 8 Grodensky Daniel, Kravitz Daniel, Zadok Avi. Ultra-wideband microwave-photonics noise radar based on optical waveform generation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(10): 839-841.
- 9 Zheng Jianyu, Wang Hui, Fu Jianbin, *et al.* Fiber-distributed ultra-wideband noise radar with steerable power spectrum and colorless base station[J]. Opt Express, 2014, 22(5): 4896-4907.

- 10 Jiang T, Long J, Wang Z, *et al.*. Experimental investigation of a direct chaotic signal radar with colpittsoscillator[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2010, 24(8-9): 1229-1239.
- 11 Qiao S, Shi Z G, Jiang T, *et al.*. A new architecture of UWB radar utilizing microwave chaotic signals and chaos synchronization[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2007, 75: 225-237.
- 12 Zhang Mingliang, Ji Yongning, Zhang Yongning, *et al.*. Remote radar based on chaos generation and radio over fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 7902412.
- 13 Ji Yongning, Zhang Mingjiang, Wang Yuncai, *et al.*. Microwave-photonic sensor for remote water-level monitoring based on chaotic laser [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2014, 24(3): 1450032.
- 14 Lin Fanyi, Liu Jiaming. Ambiguity functions of laser-based chaotic radar[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(12): 1732-1738.
- 15 Tamaševičius A, Mykolaitis G, Bumelienė S, *et al.*. Chaotic Colpitts oscillator for the ultrahigh frequency range[J]. Nonlinear Dynamics, 2006, 44(1): 159-165.
- 16 Li Jingxia, Wang Yuncai, Ma Fuchang. Experimental demonstration of 1.5 GHz chaos generation using an improved Colpitts oscillator [J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 72(3): 575-580.
- 17 Uchida Atsushi, HeilTilmann, Liu Yun, *et al.*. High-frequency broad-band signal generation using a semiconductor laser with a chaotic optical injection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(11): 1462-1467.
- 18 Wang Anbang, Wang Yuncai, He Hucheng. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by a semiconductor laser with optical feedback[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(19): 1633-1635.
- 19 Xue Pingping, Yang Lingzhen, Zhang Jianzhong, *et al.*. Dynamic characteristics of semiconductor ring laser with high bias current[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202002.
薛萍萍, 杨玲珍, 张建忠, 等. 半导体环形激光器高偏置电流下的动态特性[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202002.
- 20 Zhang Li, Wang Anbang, Li Kai, *et al.*. Fiber fault visible chaotic optical time domain reflectometry measurement method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308007.
张 丽, 王安帮, 李 凯, 等. 光纤故障可视的混沌光时域反射测量方法[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308007.
- 21 Qiao Shan, Jiang Tao, Ran Lixin, *et al.*. Ultra wide band noise signal radar utilizing microwave chaotic signals and chaos synchronization [J]. Piers Online, 2007, 3(8): 1326-1329.
- 22 Pan Xingmao, Wu Zhengmao, Tang Xi, *et al.*. Chaotic synchronizaton and communication in mesh network based on mutually coupled semiconductor lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1202005.
潘兴茂, 吴正茂, 唐 曦, 等. 基于互耦半导体激光器的混沌网状网络的同步与通信[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202005.
- 23 Roman J E, Nichols L T, Wiliams K J, *et al.*. Fiber-optic remoting of an ultrahigh dynamic range radar[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(12): 2317-2323.
- 24 Ran M, Lembrikov B I, Ben Ezra Y. Ultra-wideband radio-over-optical fiber concepts, technologies and applications[J]. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(1): 36-48.
- 25 Wang Hong, Narayanan Ram M, Zhou Zhengou. Through wall imaging based on electromagnetic modeling using UWB noise waveform [C]. 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009, 8: 802-805.
- 26 Lin F Y, Liu J M. Nonlinear dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. Optics Communications, 2003, 221(1-3): 173-180.
- 27 Piccardi Massimo. Background subtraction techniques: A review[C]. 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2004, 4: 3099-3104.
- 28 Ahmad Fauzia, Narayanan Ram M. Conventional and emerging waveforms for detection and imaging of targets behind walls[J]. Through-the-Wall Radar Imaging, 2011: 157-184.

栏目编辑: 王晓琰