

# 相位补偿算法对提高太赫兹雷达距离像分辨率的研究\*

梁美彦<sup>1)2)†</sup> 张存林<sup>1)2)</sup>

1) (北京理工大学光电学院, 北京 100081)

2) (太赫兹波谱与成像北京市重点实验室, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 首都师范大学物理系, 北京 100048)

(2014年1月25日收到; 2014年3月21日收到修改稿)

介绍了0.2 THz频率步进雷达系统以及获得一维距离像的方法, 并利用0.2 THz雷达对角反射器进行距离像分辨率实验, 分析了频率步进信号相位不一致对一维距离像以及分辨率的影响, 提出了回波相位补偿的方法. 经过相位补偿后, 目标距离像分辨率和信噪比都显著提高, 分辨率达到了厘米量级. 仿真和实验结果表明, 宽带太赫兹频率步进雷达经过相位补偿, 可以对目标进行高分辨率成像, 从而为太赫兹雷达二维和三维成像奠定了基础.

**关键词:** 太赫兹, 频率步进雷达, 相位补偿, 距离像

**PACS:** 87.50.U-, 84.40.Xb

**DOI:** 10.7498/aps.63.148701

## 1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 100 GHz—10 THz 范围的电磁波, 它介于毫米波与红外之间, 称为亚毫米波或远红外光, 处于电子学与光子学的过渡区. 太赫兹的波长比微波和毫米波短, 因此, 太赫兹雷达更易于实现大带宽和极窄天线波束, 从而获得高分辨率成像<sup>[1,2]</sup>. 相比激光雷达, 太赫兹雷达具有良好的穿透烟雾、沙尘的能力, 可以在恶劣的战场环境下工作. 基于太赫兹的上述特点, 太赫兹雷达可以用于探测烟雾、沙尘中的军事装备以及敌方隐蔽的武器, 并获得高分辨率图像.

太赫兹雷达的研究已经成为国内外的一个研究热点. 美国喷气推进实验室成功研制了 0.6 THz 高分辨率雷达成像系统, 并获得了 2 cm 的成像分辨率, 在此基础上研制了中心频率为 0.58 THz 的 3D 雷达成像系统, 获得了厘米级分辨率<sup>[3-5]</sup>. 德国应用科学研究所高频物理与雷达技术实验室研

制了 COBRA-220 雷达系统, COBRA-220 采用中心频率为 220 GHz 的线性调频信号, 在 200 m 距离处得到了 1.8 cm 的空间分辨率<sup>[6]</sup>. 2011 年, 西班牙马德里理工大学研制了带宽为 9 GHz, 中心频率为 100 GHz 的成像雷达, 进行了二维逆合成孔径 (inverse synthetic aperture radar, ISAR) 雷达成像和 3D 成像, 探测距离大于 15 m, 距离向分辨率超过 3.1 cm<sup>[7]</sup>. 2012 年, 美国国防部先进研究项目局 (defense advanced research projects agency, DARPA) 计划开发视频合成孔径雷达 (video synthetic aperture radar, ViSAR), 项目的总体目标是能够透过云层、灰尘和其他遮蔽物进行成像. ViSAR 系统透过云层对目标的定位能力等同于红外目标系统在天气状况好时提供的定位能力, 该系统还必须能够探测和跟踪移动目标并对其进行重新定位. 为了定位机动目标, ViSAR 系统需要在 100 m 的监视范围提供 5 帧/s 的图像速率以及 0.2 m 的成像分辨率. 考虑帧速率和空气的吸收, 系统选择 231.5—235 GHz 波段, 总体项目预计在 2 年内完

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB310408) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: norways\_forest@163.com

成<sup>[8]</sup>. 2013年, 德国希根大学用频率为514—565 GHz的线性调频连续波得到了毫米级的三维分辨率<sup>[9]</sup>. 在国内, 中国工程物理研究院研制了0.14 THz高分辨率ISAR成像系统, 二维成像分辨率达到了3 cm<sup>[10]</sup>, 并设计了0.34 THz收发前端和0.67 THz的ISAR成像雷达收发链路, 其中, 0.67 THz成像雷达作用距离为2 m到8 m, 成像分辨率1 cm. 中国科学院电子研究所研制了准光学0.2 THz人体快速成像系统, 达到了毫米级的空间分辨率<sup>[11,12]</sup>, 并提出了大视场全息成像重建算法<sup>[13]</sup>. 电子科技大学研制了带宽4.8 GHz中心频率为240 GHz的雷达用于ISAR成像, 成像分辨率达4 cm<sup>[14]</sup>.

国内外的成像雷达绝大多数都是基于线性调频体制的, 虽然线性调频雷达体制有容易实现大功率、匹配滤波算法容易实现脉冲压缩等优点, 但是, 就国内器件水平而言, 要实现大带宽技术还不是非常成熟, 而且成本较高. 频率步进雷达弥补了上述缺点, 它是一种典型的高分辨率雷达信号, 可以通过瞬时窄带合成宽带实现距离向的高分辨的同时降低A/D采样频率, 实现高分辨成像. 在实际中, 频率步进信号相比线性调频连续波(LFCW)信号所降低的数据量是相当可观的. 但是, 频率步进信号是利用各频点的相位信息得到距离像高分辨率的, 因此, 频率步进信号对相位变化非常敏感, 而雷达又工作在频率比微波高的太赫兹波段, 由于传输通道上的非理想因素, 相位变化一致性难以保证, 加

之太赫兹雷达的带宽较大, 目标一维距离像色散较大. 所以, 本文提出采用相位补偿的办法来提高太赫兹频率步进雷达的距离像分辨率. 实验表明, 经过相位补偿后, 距离向分辨率和信噪比都得到了明显的提高, 分辨率可达厘米量级.

## 2 0.2 THz 频率步进雷达系统

0.2 THz 频率步进雷达主要功能是成像, 其中包括一维距离像, 二维ISAR成像和三维成像. 系统如图1所示, 系统发射214—226 GHz的简单频率步进信号, 每帧由1024个脉冲组成, 合成带宽是12 GHz. 这个波段是太赫兹大气窗口, 空气吸收小. 图2是系统的结构框图, 系统主要由五模块组成: 天线、射频前端、频率源、中频模块、信号采集与处理模块.

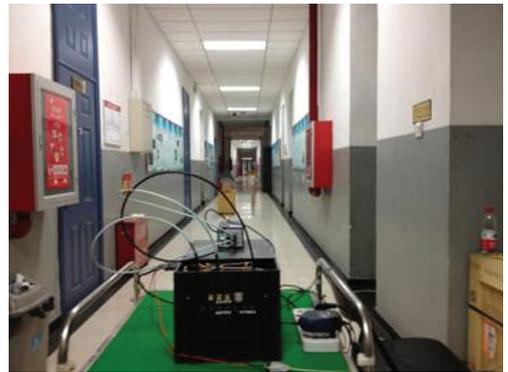


图1 太赫兹雷达系统

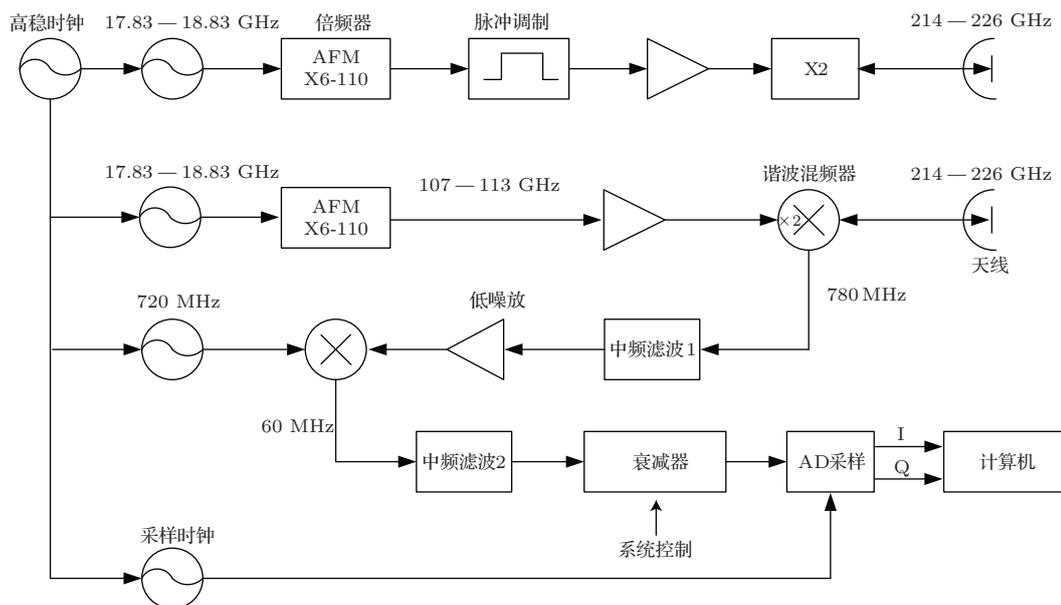


图2 0.2 THz 雷达系统框图

频率步进雷达分为高频和低频部分, 高频模块即射频前端, 把微波 (18 GHz) 12 倍频后到太赫兹 (220 GHz) 波段, 220 GHz 的波通过波导耦合到天线, 为了消除收发信号的耦合, 采用收发分置的天线. 在低频模块, 相干本振产生具有相同的位相特征的两路收发信号, 为了避免镜频干扰, 系统采用二级本振混频. 回波信号与第一本振混频产生 780 MHz 的第一中频信号, 然后再与 720 MHz 的信号混频产生 60 MHz 的第二中频信号, 经滤波以及 A/D 采样后传给上位机. 由于国内工艺水平的限制, 太赫兹雷达在低频模块实现功分.

频率源是太赫兹雷达最重要的部分, 太赫兹信号是基于肖特基二极管倍频产生的, 倍频可以降低毫米波射频的主振频率和扩展工作带宽, 同时, 又把微波设备具有的优点直接搬到太赫兹频段, 电路相对简单, 容易实现. 而随着器件水平的不断发展, 高稳定、低杂散、低相噪、高功率的 Ka, Ku 波段以下的频率源技术已经发展成熟, 用高稳定的微波源作为基准源, 驱动混频器, 进行倍频, 实现了太赫兹信号的产生.

跳频源的设计是雷达系统设计的重点, 为了实现成像的高分辨、宽的不模糊窗的要求, 跳频源必须具有宽带、低杂散、低相噪的性能. 实验采用锁相环 (phase-locked loop, PLL), 通过快速改变锁相环的分频系数来实现频率的跳变. 这种方法产生的信号带宽较宽, 而且具有很低的相位噪声和杂散, 但由于在频率跳变过程中存在一个频率牵引, 因此, 相比于直接数字式频率合成器, PLL 的锁定时间比较长. 在雷达成像时间限制不是很严格的情况下, 锁相环的跳频建立时间能够满足系统要求.

太赫兹雷达接收机系统主要由两个关键的技术组成: 一是相干中频本振产生技术; 二是谐波混频与超外差结合的接收技术. 收发系统采用同一跳频源, 保证了收发支路的相参性, 对实现成像所需的提取回波信号的相位信息提供了保证. 接收机部分先进行二次谐波混频, 然后超外差接收, 结合谐波混频与超外差接收的优点, 既确保了系统接收机的可实现性, 又提高了系统的噪声系数, 保证了接收机的灵敏度和接收性能.

为了使雷达系统同时具有探测近处和远处目标的能力, 在接收链路加入了大动态范围的自动增益控制器, 最大衰减为 30 dB. 信号的发射和接收是通过上位机控制的. 上位机通过串口控制发送 214—226 GHz 的跳频信号, 信号经目标反射后, 回

波通过天线接收, 下变频到 60 MHz, 经采样后, 以太网把采集到的信号传送给上位机. 把采集到的数据逆傅里叶变换即为一维高分辨距离像. 相比线性调频信号, 步进频信号不易实现大功率, 所以该系统的功率不到 8 mW. 同时, 太赫兹受水汽的影响比较严重, 探测距离远远小于微波雷达, 在实际测量中可以对 35 m 的目标成一维距离像, 但是信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 较低.

### 3 相位补偿算法

由于雷达工作在太赫兹波段, 频率较高, 难以保证相位变化的一致性. 而频率步进信号是利用各频点的相位信息得到的高分辨率, 所以步进频信号对相位的变化非常敏感, 相位的变化会导致距离分辨率下降, 信噪比降低和距离像畸变. 由于太赫兹信号带宽较大, 角反射器对每个频点的色散不一致, 而且回波信号在硬件传输通道上可能存在的非理想因素, 导致信号的幅度、相位随着频率而变化. 因此, 要对回波进行相位补偿.

相位补偿算法:

- 1) 将采样得到的 I/Q 两路数据合成有振幅和相位信息的回波数据;
- 2) 利用公式  $\varphi = \arctan -1 (Q/I)$  提取回波各个频点的相位信息;
- 3) 相位会出现  $2\pi$  模糊的现象, 计算得到的在相位  $\varphi$  在  $[-\pi, \pi]$  之间, 需要根据相位变化情况, 对所有跳变点加上或者减去  $2\pi$ ;
- 4) 对于简单步进频信号, 每个频点的相位的变化应该是线性的, 所以对得到的相位变化曲线进行线性拟合;
- 5) 将拟合后的相位代替原始信号的相位, 得到相位线性变化回波信号;
- 6) 将相位补偿处理后的信号逆傅里叶变换 (inverse fast fourier transform, IFFT) 之后, 就得到了目标的高分辨距离像.

### 4 实验结果与讨论

实验利用 0.2 THz 频率步进雷达对角反射器进行一维距离成像的同时, 对雷达距离向分辨率进行了测试. 一维距离像实验中, 单个角反射器放置于距离雷达约为 10 m 的木质小车上, 雷达系统发送 214—226 GHz 步进频信号, 每帧 1024 个频点, 脉冲

重复周期是 60  $\mu\text{s}$ . 为了得到比较强的回波信号, 角反射器正对雷达, 角反射器直角边长是 14 cm. 在距离向分辨率实验中, 利用两个相同的角反射器前后错开一定距离, 探测回波信号. 喇叭天线对回波接收后通过波导传输, 对模拟信号 A/D 采样后, 经过正交解调, 把采集到的信号传输到上位机. 将上位机接收到的回波数据相位补偿后再进行 IFFT 处理, 就可以得到目标的高分辨率一维距离像.

### 4.1 太赫兹雷达一维距离像结果

图 3 是太赫兹雷达对 10 m 处目标一维距离像的仿真结果, 可以看出, 太赫兹雷达可以实现距离像高分辨, 带宽为 12 GHz 的雷达距离向理论分辨率

$$\rho = \frac{c}{2B} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 12 \text{ GHz}} = 1.25 \text{ cm}.$$

图 4 是该实验中测得的背景噪声, 实验时, 回波强度要高于背景噪声, 才可以探测到目标. 图 5 是将角反射器位于距离雷达 10 m 处, 将采集到的信号直接进行 IFFT 得到的一维距离像的成像结果. 对比图 3 的仿真结果和图 5 的实验结果可以看出, 单一目标距离维成像可以直接采用 IFFT 方法就可以对目标距离维进行精确成像, 实际成像和理论距离向误差在厘米量级. 但是, 因为系统带宽较大, 距离向色散严重. 从图 5 可以看出, 距离像的包络展宽较大. 如果存在多个目标, 可能严重影响雷达系统的分辨率, 甚至不能分辨目标. 因此, 在 IFFT 处理之前, 需要通过算法对回波信号进行相位补偿, 从而在保证距离像精度的同时, 提高距离像的分辨率. 图 6 是采用相位补偿算法对一个角反射器距离维成像结果. 从图 6 可以看出, 经过相位补偿, 在保证距离像精度的同时, 距离像分辨率得到了明显的提高, 同时, 经过相位补偿信噪比提高了 7 dB. 所以, 相位补偿对于太赫兹步进频率雷达不仅可以提高距离向分辨率而且可以改善信噪比. 实验还探测了太赫兹雷达的作用距离. 在室温环境下, 0.2 THz 频率步进雷达可以探测到 35 m 处的目标. 当距离大于 35 m 时, 虽然也可以探测到目标, 但是 SNR 较低, 只有 12 dB.

太赫兹频率步进雷达与德国工作在 220 GHz 的 COBRA-220 相比, COBRA-220 为带宽 8 GHz 的 LFCW 信号, 其成像距离为 200 m, 这是由于相比线性调频信号, 步进频信号功率更低, 所以探测距离只能达到几十米. COBRA-220 的分辨率比太

赫兹雷达高, 原因是宽带太赫兹步进频雷达在传输通道上存在色散, 幅相不一致严重影响成像分辨率, 需要通过相位补偿来提高分辨率.

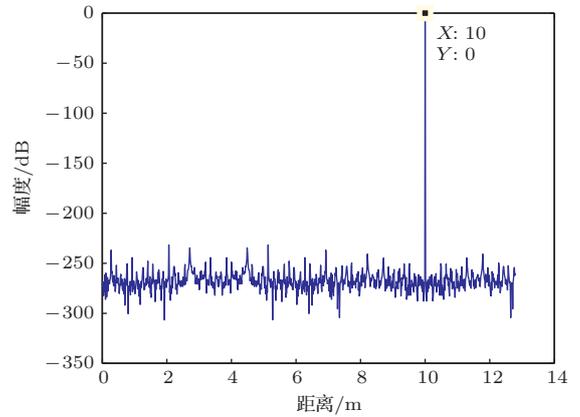


图 3 一维距离像仿真结果

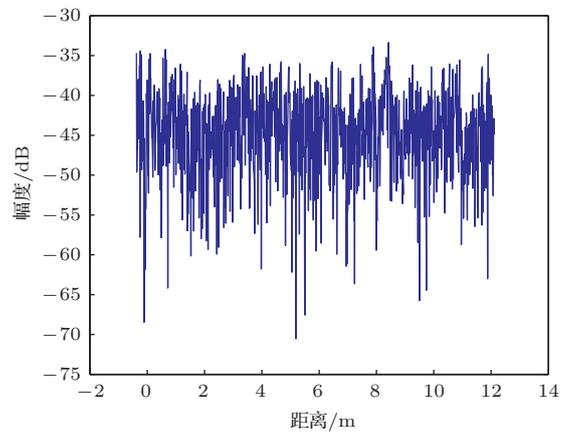


图 4 实验中的背景噪声

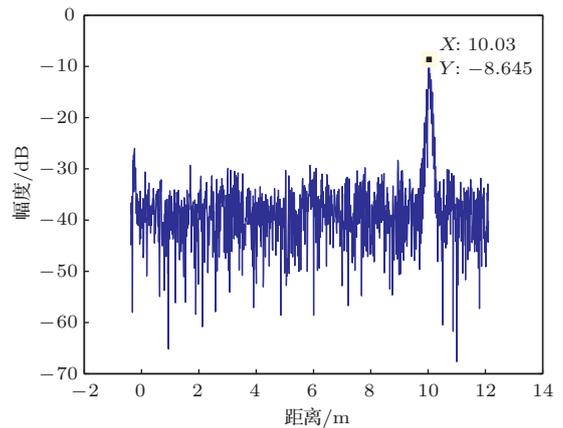


图 5 角反射器置于距离雷达 10 m 处的探测结果

### 4.2 距离向分辨率实验结果

将两个角反射器置于距雷达约为 10 m 的位置, 两个角反射器的径向距离为 3 cm, 测试太赫兹雷达

距离向分辨率. 图7为距离向分辨率实验结果, 可以看出, 经过相位补偿, 0.2 THz 雷达可以分辨距离向3 cm的两个角反射器. 测得的距离向分辨率为9.1 cm, 误差为6.1 cm. 这个误差来源于定标的精度, 可以通过重新定标来改善.

系统的距离向分辨率理论值是1.25 cm, 而实验得到的距离向分辨率是3 cm, 这个差别与系统本身有关, 回波在传输通道上的一些非理想因素会导致幅相不一致, 虽然进行了相位补偿, 但是补偿掉的只是一次相位误差, 对于高次相位误差还没有办法有效地补偿, 因此, 距离像分辨率要略低于理论值.

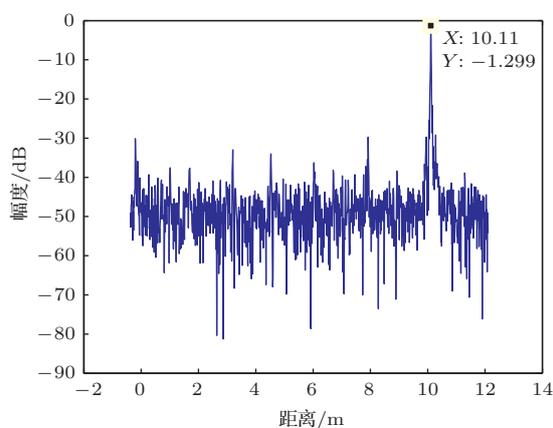


图6 经过相位补偿之后的一维距离像结果

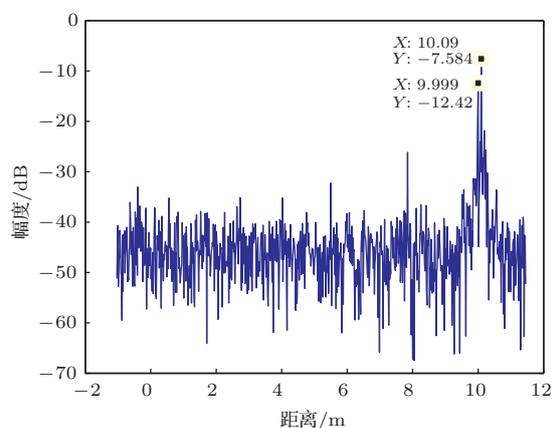


图7 角反射器分辨率实验

## 5 结 论

本文介绍了中心频率为0.2 THz, 合成带宽为12 GHz的步进频率太赫兹雷达系统的基本组成和

工作原理, 由于频率步进信号合成的大带宽具有距离向高分辨率, 并且在获得距离高分辨率的同时降低对A/D采样和数字信号处理机瞬时带宽的要求, 所以, 频率步进太赫兹雷达在保证成像质量的同时降低了成本. 但是, 由于频率步进雷达的合成带宽较大, 色散效应对步进频谱序列相位影响也大, 对回波相位补偿处理之后, 太赫兹雷达对角反射器距离向探测精度和距离分辨率都可以达到厘米量级. 对于雷达系统存在的一些问题, 可以通过改进链路, 提高发射功率, 以提高太赫兹雷达的作用距离, 并在此基础上研制新的算法减小分辨率误差, 从而进行高分辨率二维ISAR成像和三维成像.

## 参考文献

- [1] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. 2011 *IEEE Trans. on Terahertz Sci. Technol.* **1** 169
- [2] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. 2010 *Proceedings of SPIE Orlando*, 2010 7671 p76710Y-1
- [3] Dengler R J, Cooper K B, Chattopadhyay G, et al. 2007 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Honolulu*, 2007 p1371
- [4] Chattopadhyay G, Cooper K B, Dengler R, et al. 2008 *19th International Symposium on Space Terahertz Technology Groningen*, April 28–30, 2008 p300
- [5] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G, et al. 2008 *IEEE Micro. and Wire. Comp. Lett.* **18** 64
- [6] Essen H, Wahlen A, Sommeretal R, et al. 2007 *Electron. Lett.* **43** 1114
- [7] Mencia-Oliva B, Grajal J, Badolato A 2011 *IEEE Radar Conference*, May 2011 p389
- [8] Broad Agency Announcement, Video Synthetic Aperture Radar, Strategic Technology Office DARPA-BAA-12-41 United States 2012
- [9] Ding J S, Kahl M, Loffeld O, et al. 2013 *IEEE Trans. on Terahertz Sci. Technol.* **3** 606
- [10] China Academy of Engineering Physics THz Communication and Radar Technology Obtained Significant Breakthrough 2012 (in Chinese) [中国工程物理研究院太赫兹通信和雷达技术取得重要突破 2012 信息与电子工程]
- [11] Gao X, Li C, Gu S M, Fang G Y 2012 *IEEE Antennas and Wireless Propaga. Lett.* **11** 787
- [12] Gao X, Li C, Fang G Y 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 068401
- [13] Gao X, Li C, Fang G Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 028401
- [14] Zhang B, Pi Y M, Yang X B 2013 *IEEE International Conference on Communications*, June 2013 p921

# Improvement in the range resolution of THz radar using phase compensation algorithm\*

Liang Mei-Yan<sup>1)2)†</sup> Zhang Cun-Lin<sup>1)2)</sup>

1) (School of Opto-Electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

2) (Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

( Received 25 January 2014; revised manuscript received 21 March 2014 )

## Abstract

The paper describes the principle of 0.2 THz stepped-frequency radar system which is utilized to achieve a one-dimensional range profile and range resolution. Terahertz (THz) stepped frequency radar is more susceptible to the phase error which will cause the spread and shift of range profile, thus affecting the quality of the high resolution range profile and signal-to-noise ratio. Therefore, a method of phase compensation is proposed to improve the range resolution. After phase compensation, the resolution and signal-to-noise ratio are improved remarkably. The range resolution can reach centimeter scale. Experimental and simulation results indicate that THz stepped frequency radar can reach high resolution range profile with the phase compensation method, which provides a foundation for further research on two-dimensional and three-dimensional image in the THz band.

**Keywords:** THz, stepped-frequency radar, phase compensation, range profile

**PACS:** 87.50.U-, 84.40.Xb

**DOI:** [10.7498/aps.63.148701](https://doi.org/10.7498/aps.63.148701)

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310408).

† Corresponding author. E-mail: [norways\\_forest@163.com](mailto:norways_forest@163.com)