

基于距离多普勒概念的全息雷达成像算法

江 舸¹, 刘 杰^{1,2}, 经 文¹, 成彬彬^{1,2}, 周剑雄³, 张 健^{1,2*}

- (1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 中国工程物理研究院 微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999;
3. 国防科技大学 电子科学与工程学院 ATR 实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:全息雷达成像系统具有电离辐射小、穿透衣服等优点,在人体安检等领域具有广泛的应用前景.然而,现有系统尚存在多运动目标补偿及快速成像能力不足的问题,限制了其在火车站等人流量大的场景中的应用.本文提出了一种基于距离多普勒概念的全息雷达成像方法,其优点是成像速度快、运动补偿方便,具有多运动目标快速成像的潜力.该方法利用了信号在时间采样和空间采样上的对称性,将合成孔径雷达成像中常用的距离多普勒算法引入全息雷达成像.本文对距离多普勒全息雷达成像算法进行了推导,通过仿真及试验,验证了该成像方法具有多目标运动补偿及快速成像的能力.

关键词:全息成像;运动目标;距离多普勒算法;微波全息;太赫兹成像;毫米波成像
中图分类号:TN957.52;TP722.6 **文献标识码:**A

A range-doppler algorithm for holographic radar imaging

JIANG Ge¹, LIU Jie^{1,2}, JING Wen¹, CHENG Bin-Bin^{1,2}, ZHOU Jian-Xiong³, ZHANG Jian^{1,2*}

- (1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;
2. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;
3. ATR Lab, School of Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Holographic radar is well suited for the detection of concealed weapons or other contraband carried on by persons since that radio waves are nonionizing, common clothing material penetrable, and can be reflected by the human body and any concealed items. Despite the theoretical potential of holographic radar to provide a useful detection technique, this is unlikely possible in crowd circumstances. The image tends to be blurred by the combined effects of multi-targets and target-motion. This paper proposes an algorithm of holographic radar imaging based on range-doppler concepts, which has some advantage in multi-moving target compensation and rapid imaging. According to the symmetry between the time-sampling and the space-sampling, the process of deducing the range-doppler holographic radar imaging algorithm is also proposed in this paper, and simulations and examination results are given to show that this algorithm has the ability to get the multi-targets image rapidly.

Key words: holographic imaging, moving target, range doppler algorithm, microwave holography, terahertz imaging, millimeter wave imaging
PACS: 42.25.Bs, 43.30.Pc, 84.40.Xb

引言

全息雷达成像概念始于上世纪 70 年代^[1],采用

无线电波(微波、毫米波、太赫兹)穿透衣服对隐藏物品进行成像,且电离辐射小,在人体安检等领域具有广泛的应用前景.在 Collins^[2]的基础上, sheen

收稿日期:2016-10-23,修回日期:2017-03-11

Received date: 2016-10-23, revised date: 2017-03-11

基金项目:国家自然科学基金(61601424);国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(U1630101);国家重点基础研究发展计划(2015CB755406)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61601424), NSAF (U1630101) and the National Key Basic Research and Development Program (2015CB755406)

作者简介(Biography): 江 舸(1982-),男,四川乐山人,副研究员,硕士. 主要研究领域为太赫兹成像、雷达信号处理. E-mail: jiangge321@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: zhjmy@263.net

等^[3-7]不断进行改进,其研制的 ProVision 系统成功应用于机场安检.此外,国外多个团队^[8-13]也正在开展全息雷达成像的研究工作.在国内,主要研究单位有航天二院^[14-15]、中科院电子所^[16-17]、国防科技大学^[18]、北京理工大学^[18-19]、清华大学^[20]、南京理工大学^[21]、北京航空航天大学^[22]、东南大学^[23]、西北工业大学^[24]和中国工程物理研究院^[24]等.但是,ProVision 系列产品和同类产品的最大局限性在于成像时间长且人体不可运动,要求受检者逐个进入机器并保持静止几秒钟.在火车站等人流量大的场景中,上述安检成像系统尚不能满足实际需求.

目前,针对运动补偿和快速成像这两个关键技术,国内外正在开展研究.一方面,针对运动补偿问题,任白玲^[18]提出了空间谱域运动补偿算法,孙鑫^[27]在时域算法的框架下给出了一种消除运动虚假点的方法.但是,这两种算法均有不足.空间谱域算法的局限性在于,不具备对不同速度目标分别进行补偿的能力.时域算法的局限性在于运算量大,通常作为验证算法,很少在实际快速成像中应用.因此,在火车站等人流量大的场景中,多个运动目标的补偿及成像仍然是一个难点问题.另一方面,针对成像时间长的问题,Ahmed 与 RS 公司合作,研制出了 QPASS 成像系统^[28],可在 25 ms 内实现数据采集.此外,John Hunt 提出了超材料的方案^[29],给出了快速数据采集的新途径.但是,成像时间由数据获取速度和成像运算速度两者共同决定^[8].获取海量数据后,如何提高成像运算速度仍将面临困难.开发匹配现有硬件运算能力的快速成像算法,成为制约成像时间的瓶颈问题.

距离多普勒域成像算法^[31]具有成像速度快、运动补偿方便的优点.从提出至今,在合成孔径雷达成像中得到了广泛使用.但是,对于固定的天线阵列,回波信号中并不包含天线随平台移动带来的多普勒信息,影响了距离多普勒概念在全息雷达成像场景中的应用.

首先从时间采样和空间采样的对称性,这一现代信号处理的基本认识出发,讨论了全息雷达回波与合成孔径雷达回波在时间-频率域、空间-空间谱域之间的对应关系,从理论上分析了距离多普勒算法推广至全息雷达成像的可行性.其次,针对线性调频信号,完成了三维全息雷达成像距离多普勒域算法的推导.再次,将距离多普勒域算法同时(空)域算法、空间谱域算法进行了分析,比较了静止/运动的强散射点在这三种算法下的点目标扩散函数

(point spread function, PSF),仿真验证了距离多普勒域成像算法具有多目标运动补偿的能力.最后,利用实测回波数据给出了典型目标在三种算法下的成像结果,验证了距离多普勒域成像算法的快速成像能力.

1 全息雷达成像原理及典型算法介绍

1.1 全息雷达成像的原理

图 1 为全息雷达成像的场景.图中,成像目标位于 $z=0$ 处,在目标上任意一点 (x, y, z) 的散射系数为 $\sigma(x, y, z)$.在 $z=d$ 的 $x'-y'$ 平面上,沿平 $x'-y'$ 面以 $\Delta x, \Delta y$ 为间隔放置天线.天线对目标发射电磁信号 $s(t)$,电磁波在传播过程中遇到目标产生散射,散射波在空间各点处形成衍射.对散射/衍射场进行测量,通过天线获得的目标回波,并用 $s_r(x', y', z_0, t)$ 表示.目标回波与发射信号的关系可由式(1)表示.式中 $t(x', y') = 2R/c = 2\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-d)^2}/c$,为某散射中心 $\sigma(x, y, z)$ 到观测面 (x', y') 的时延.式(1)的含义为,在高频区,目标总的回波可以认为是由某些局部位置上的散射源 $\sigma(x, y, z)$ 的相干合成:

$$s_r(x', y', d, t) = \iiint \sigma(x, y, z) \cdot s[t - t(x', y')] dx dy dz \quad (1)$$

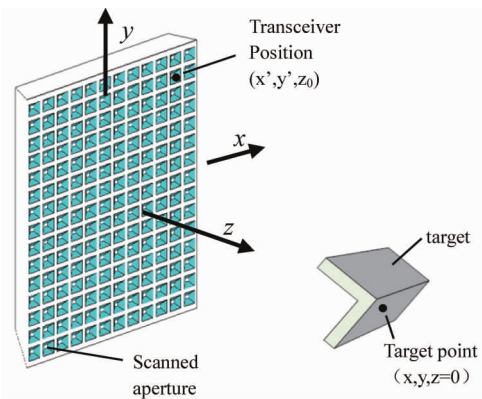


图 1 全息雷达成像场景

Fig. 1 Holographic imaging system configuration

从电磁逆散射的上看,全息雷达成像属于电磁散射/衍射正问题所对应的逆问题研究范畴.在工程上,为避免非线性带来的非适定性,通常采用弱散射近似(Born 近似和 Rytov 近似)和低频近似(物理光学近似和基尔霍夫近似)等线性近似假设.当采用线性近似假设后,全息雷达成像就简化为逆衍射重构问题,即通过 $s_r(x', y', d, t)$ 反演目标散射系数 σ

(x, y, z) 分布的线性过程.

1.2 全息雷达成像时(空)域算法介绍

从时(空)域看,通过 $s_r(x', y', d, t)$ 反演目标散射系数 $\sigma(x, y, z)$ 分布,就是对式(1)的一个线性逆滤波过程,且滤波函数 $s[t - t_i(x', y')]$ 是已知的. 对于带限信号,逆滤波通常用匹配滤波实现最佳逼近,匹配滤波波形为 $s[t - t_i(x', y')]$ 的共轭倒置. 则第 i 点的散射系数可由下式进行重构.

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_i(x, y, z) &= \iint s_r(x', y', d, t) \otimes s[t - t_i(x', y')] dx' dy' \\ &= \iint s_r(x', y', d, t) * s^*[t_i(x', y') - t] dx' dy'\end{aligned}, \quad (2)$$

式中, \otimes 表示卷积, $*$ 表示相关, s^* 表示共轭. 将式(1)代入式(2)可得:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_i(x, y, z) &= \iiint \iiint s[t - t_i(x', y')] * s^*[t_i(x', y') - t] \cdot \\ &\quad \sigma_i(x, y, z) dx' dy' dx dy dz \\ &= \iiint \sigma_i(x, y, z) \text{PSF}(\cdot) dx dy dz\end{aligned}, \quad (3)$$

式(3)中, $\text{PSF}(\cdot)$ 为点目标扩展函数. 式(3)表明,通过时域逆滤波(或匹配滤波)运算,即可在时(空)域下实现对目标散射系数 $\sigma(x, y, z)$ 的重构. 典型的时(空)域算法如后向投影(BP)算法,该算法的流程详见第4.1节.

1.3 全息雷达成像空间谱域算法介绍

空间谱域是指三维空间的傅立叶变换对所在的域,也被称为波数域、角谱域等,空间谱域算法就是将目标回波信号变换到空间谱域进行成像的算法. 自从 Sheen 等^[3]在全息雷达成像中引入了空间谱域算法后,该算法得到了广泛的应用^[14, 17, 21-24, 32-34]. Sheen 在推导中,按频率步进信号波形,将式(1)改写为频域形式,如式(4)所示. 其中, k 称为波数或空间(角)频率, $k = 2\pi f_r/c$. 进一步,假设目标某点的入射场和格林函数近似为球面波来展开推导,获得了目标散射系数 $\sigma(x, y, z)$ 与目标回波 $s_r(x', y', d, f_r)$ 之间的关系,如式(5)所示.

$$s_r(x', y', d, f_r) = \iiint \exp[-j2k \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-d)^2}] \cdot \sigma(x, y, z) dx dy dz, \quad (4)$$

$$\text{FT}_{2\text{D}}\{s_r(x', y', d, f_r)\} = \text{FT}_{3\text{D}}[\sigma(x, y, z)] \exp(jd \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}). \quad (5)$$

式(5)中, $\text{FT}_{2\text{D}}\{s_r(x', y', d, f_r)\}$ 是目标回波 $s_r(x', y', d, f_r)$ 的空间谱表达式. 式(5)的含义为, $\text{FT}_{2\text{D}}\{s_r(x', y', d, f_r)\}$ 是初始空间谱 $\text{FT}_{3\text{D}}[\sigma(x, y, z)]$ 和传

播因子 $\exp(jd \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2})$ 的乘积. 将 $\text{FT}_{2\text{D}}\{s_r(x', y', d, f_r)\}$ 改写为 $S_r(k_x, k_y, d, f_r)$, 对式(5)做变换,可得:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}(x, y, z) &= \text{FT}_{3\text{D}}^{-1}\{S_r(k_x, k_y, d, f_r) \\ &\quad \exp(-jd \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2})\}, \quad (6)\end{aligned}$$

式(6)表明,目标的三维重构图像 $\bar{\sigma}(x, y, z)$, 可以从目标回波的空间谱 $S_r(k_x, k_y, d, f_r)$ 出发,通过运算得到. 典型的空谱域算法有 ωK 算法,算法流程详见第4.1节.

2 基于距离多普勒概念的全息雷达成像可行性分析

目前,全息雷达成像面临成像时间长和目标运动补偿难两个问题. 而距离多普勒域算法在合成孔径雷达成像中得到广泛应用,具有解决上述问题的潜力. 在推导基于距离多普勒概念的全息雷达成像算法之前,先要回答距离多普勒成像算法推广至全息雷达成像的可行性的问题. 由于信号在时间采样和空间采样上具有对称性,我们从全息雷达和合成孔径雷达的回波信号在时间-频率域和空间-空间谱域之间的关系展开分析.

在全息雷达成像中,回波蕴含的是目标在空间域上的方向或位置信息. 而在合成孔径雷达成像中,由于天线是随时间运动的,回波蕴含的是目标在时间域上的多普勒信息. 从表面上看,全息雷达和合成孔径雷达分别是在空间-空间谱域和时间-多普勒域上进行处理,两者回波的物理含义有差异,影响了距离多普勒域这类成像算法在全息雷达成像场景中的应用.

分析合成孔径雷达回波信号在时间域和全息雷达回波信号在空间域之间的对应关系. 设合成孔径雷达放置在匀速运动的载体平台上,天线与目标间的等效速度为 V ,雷达以一定的重复周期 T_r 发射脉冲,于是在空间形成了均匀直线阵列,阵列的间隔为 $d = VT_r$. 因此,可以说全息雷达中的阵列间隔 d 和合成孔径雷达中的重复周期 T_r 是线性的,说明两者具有等效性.

进一步分析合成孔径雷达回波信号在频域和全息雷达回波信号在空间谱域之间的对应关系. 合成孔径雷达成像中的多普勒频率可表示为 $f_d = KV \sin\theta/2\pi$, 其中 K 称为波数或空间角频率(雷达按双程计算, $K = 4\pi f/c$). 另一方面, $K \sin\theta$ 为 x 轴的波数分量 K_x . 因此,多普勒频率 f_d 可表示为: $f_d = VK_x/$

2π . 这说明全息雷达中的波数分量 K_x 和合成孔径雷达中的多普勒频率 f_d 是线性的, 说明两者也具有等效性.

上述分析表明全息雷达和合成孔径雷达的回波信号在时间-频率域和空间-空间谱域上具有等效性. 如果在全息雷达成像中借用多普勒频率的概念, 有望实现距离多普勒域算法在全息雷达成像中的应用.

3 基于距离多普勒概念的全息雷达成像算法推导

虽然, 在全息雷达成像中天线阵列是固定的, 没有合成孔径雷达成像中的多普勒概念. 但是, 依据时间-频率域和空间-空间谱域之间的等效性, 可以推导出目标回波在距离多普勒域的表达式 $S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, f_r)$ 和目标的三维重构图像 $\tilde{\sigma}(x, y, z)$ 之间的关系式.

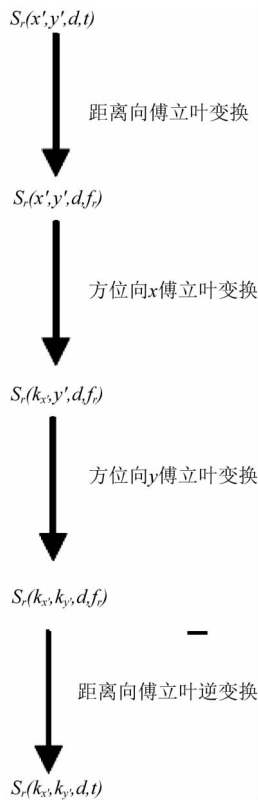


图2 距离多普勒域表达式的推导过程
Fig. 2 Derivation Process of range-dopple domain expressions

上述关系式的推导流程如图2所示. 直观上, $S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t)$ 可由 $s_r(x', y', d, t)$ 进行二维傅立叶变化获得, 不必如图2那样复杂. 但是, 由于距离和方位的交叉耦合项复杂, 通常先推导 $s_r(x', y', d, t)$ 在空间谱域的表达式 $S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, f_r)$, 再对 $S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, f_r)$ 做距离向傅立叶逆变换获得 $S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t)$.

并且, 推导中多次用到了驻定相位原理 (POSP), 附录给出了发射信号为线性调频信号时的 $\tilde{\sigma}(x, y, z)$ 同 $S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t)$ 之间关系式的推导过程.

通过附录的推导, 线性调频回波信号在距离多普勒域表达式如下式所示:

$$S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t) = \text{FT}_{3\text{D}}[\sigma(x, y, z)] \exp\left(-j \frac{4\pi d D(f_r, k_{x'}, k_{y'}) f_0}{c}\right) \cdot \exp\left\{j\pi \frac{K_r}{1 - K_r Z} \left[t - \frac{2d}{cD(f, k_{x'}, k_{y'})}\right]\right\} \quad (7)$$

对式(7)做变换, 可得:

$$\tilde{\sigma}(x, y, z) = \text{FT}_{3\text{D}}^{-1} \left\{ S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t) \exp\left(j \frac{4\pi d D(f_r, k_{x'}, k_{y'}) f_0}{c}\right) \cdot \exp\left[-j\pi \frac{K_r}{1 - K_r Z} \left(t - \frac{2d}{cD(f, k_{x'}, k_{y'})}\right)\right] \right\} \quad (8)$$

式(8)表明, 从 $S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t)$ 出发通过运算, 可以得到目标的三维重构图像 $\tilde{\sigma}(x, y, z)$. 典型的距离多普勒谱域算法有 RD 算法, 算法流程详见第4.1节.

对于运动目标, 设目标到观测面 (x', y') 的距离 R , 随观测位置 x', y' 的变化而变化, 即 $R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z(x', y') - d)^2} / c$. 将重新定义的 R 带入式(1), 按照图2中的流程重新进行推导, 可得三维重构图像 $\tilde{\sigma}(x, y, z)$ 与 $S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t)$ 在目标运动场景下的关系式为:

$$\text{FT}_{3\text{D}}^{-1} = \left\{ S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t) \exp\left(j \frac{4\pi d D(f_r, k_{x'}, k_{y'}) f_0}{c}\right) \cdot \exp\left(Ak_{x'} k_{y'} \frac{\partial^2 z(x', y')}{\partial x' \partial y'} + 2\pi k_{x'} \frac{\partial z(x', y')}{\partial x'} + 2\pi k_{y'} \frac{\partial z(x', y')}{\partial y'}\right) \cdot \exp\left[j\pi \frac{K_r}{1 - K_r Z} \left(t - \frac{2d}{cD(f, k_{x'}, k_{y'})}\right)^2\right] \right\} \quad (9)$$

式(9)括号中第一个指数项 $4\pi d D(k_{x'}, k_{y'}) f_0 / c$ 为由距离徙动 (RCM) 引起的方位向调制, 是对方位匹配滤波器的更精确的表示形式, 对 $D(k_{x'}, k_{y'})$ 进行展开并忽略 $k_{x'}, k_{y'}$ 的二阶以上项, 则该指数项退化为线性调频信号的表达式. 第二个指数项为由目标运动引起的调制, 成像算法中需要通过运动补偿来消除该指数项, 以防止运动带来的图像散焦. 式(9)大括号中的第三个指数项为由距离徙动引起的距离向调制, 对该项的补偿包括两个步骤. 一是补偿参考距离处的统一的距离徙动, 即 RCMC. 另一部分是补偿

由 Z 距离徙动引起的散焦, Z 的定义见式 (17), 是距离和 k_x, k_y 的交叉耦合项. 一般而言, $|K_r Z| \ll 1$, $K_r/(1 - K_r Z)$ 与 K_r 仅有微小差异, 但这种差异已足够引起散焦, 需要进行补偿. 在雷达成像中, $1/Z$ 被称为二次距离压缩 (SRC) 滤波器. 与式 (9) 相对应的距离多普勒成像算法流程见图 3c).

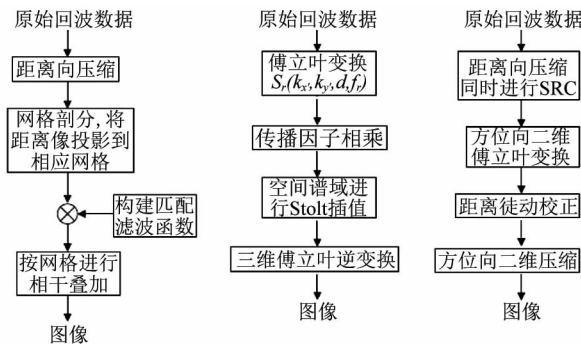


图3 三种算法的实现框图 (a) BP 算法, (b) ωK 算法, (c) RD 算法

Fig.3 Implementation structure of three algorithms (a) BP algorithm, (b) ωK algorithm, (c) RD algorithm

4 时(空)域、空间谱域、距离多普勒域算法的比较

4.1 三种算法简介

图3示意了时(空)域、空间谱域、距离多普勒域的三种典型算法的处理流程. 其中, 图3(a)给出的是时(空)域的典型算法—BP算法^[18]. 时(空)域算法的优点是, 成像机理简单, 成像结果精确, 常常作为其它算法的验证对象. 缺点是运算量巨大, 即便BP算法通过对所有的回波信号进行相同的匹配滤波处理, 将计算复杂度从 N^4 减小到 N^3 的量级, 但是运算量仍然巨大. 图3(b)给出的是空间谱域的典型算法— ωK 算法^[3]. ωK 算法和BP算法一样, 均基于球面波假设, 原理上能对整个区域实现无几何形变的完全聚焦. 其优势是计算效率高, 计算复杂度在 N^2 的量级. 同时, 能够很好的处理宽孔径数据并实现高分辨成像. 但是, 该算法无法分别补偿多个独立运动目标的等效雷达速度, 限制了该算法在多运动目标场景中的应用. 图3(c)给出的是距离多普勒域的典型算法—RD算法. 该算法的优点是运算速度快, 能适应参数随距离向的变化. 该算法的计算复杂度在 N^2 的量级, 且每步操作均基于一维运算, 简单高效易于实现. 同时, 可以通过等效速度 V 的变化, 对距离徙动补偿 (RCMC) 等操作进行调整. 这种适

应性源于数据的距离多普勒域处理. 但是, 该算法的缺点是补偿项多. 表1给出了三种成像算法的利弊的比较结果.

表1 算法分析
Table 1 Algorithm analyse

成像算法	实现域	精度	计算复杂度	多目标补偿
BP 算法	时域	高	N^3	可
ωK 算法	空间谱域	高	N^2 (需要三维插值运算)	否
RD 算法	距离多普勒域	中等	N^2 (运算都为二维操作)	可

4.2 静止目标的 PSF 比较

为比较三种算法的成像质量, 引入点目标扩展函数 (PSF) 帮助分析. 仿真中, 假设成像场景如图4所示, 一维天线阵列与 x 轴平行, 天线沿 y 轴方向以 1 m/s 速度进行扫描, 形成 100×100 阵元的二维平面阵, 阵元之间的间距为 1 mm , 天线阵大小为 $0.1 \text{ m} * 0.1 \text{ m}$, 天线阵离中心点距离为 0.25 m . 目标为两个点目标, 目标1的坐标为 $(0, 0, 0)$, 目标2的坐标为 $(-0.08, -0.08, -0.08)$, 单位为 m .

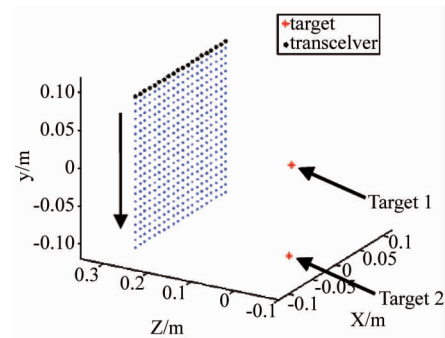


图4 仿真场景
Fig.4 Simulation scenario

对回波信号用三种算法分别进行成像, 点目标1的在三种算法中的成像结果如图5所示, 点目标2的成像结果如图6所示. 比较图5和图6, 发现目标1和目标2的PSF略有不同, 这是由回波信号的空变性导致的, 与算法的关系不大. 再比较相同目标在不同算法下的PSF, BP成像结果最好, RD和 ωK 的结果稍差.

4.3 运动目标的 PSF 比较

在静止目标仿真的基础上, 设两个点均为运动目标, 其中目标1沿 z 轴以 0.1 m/s 的速度运动, 目标2沿 z 轴以 -0.1 m/s 的速度运动. 其它的系统参数不变, 重新仿真获得运动目标的回波信号. 在三种成像算法中增加运动补偿步骤. 为简化运动补偿的

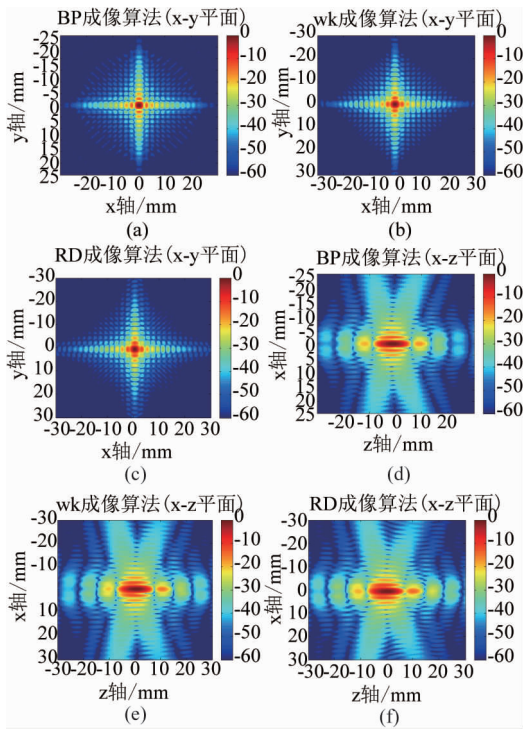


图5 点目标1的成像结果
Fig. 5 Imaging results of point target 1

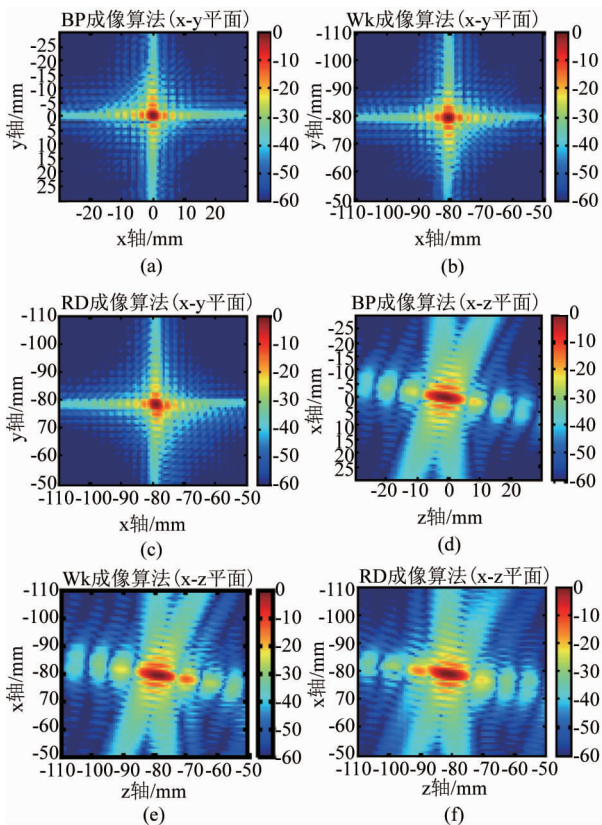


图6 点目标2的成像结果
Fig. 6 Imaging results of point target 2

个网格点根据不同目标的速度分别进行运动补偿, wk 算法在空间谱域根据同一个速度统一进行运动补偿. 而 RD 算法则根据式(9)的第二个指数项在距离多普勒域按不同距离分别对不同目标进行运动补偿. 其中,式(9)与目标1有关的运动补偿项分别为 $\partial^2 z(x', y') / \partial x' \partial y' = 0, \partial z(x', y') / \partial x' = 0, \partial z(x', y') / \partial y' = 0.1$, 与目标2有关的运动补偿项分别为 $\partial^2 z(x', y') / \partial x' \partial y' = 0, \partial z(x', y') / \partial x' = 0, \partial z(x', y') / \partial y' = -0.1$. 三种算法对目标1和目标2的成像结果如图7、图8所示. 比较相同目标在不同算法下的PSF, BP算法和RD算法均能对两个运动目标同时聚焦, BP算法的聚焦效果最好, RD算法的聚焦效果次之, ωk 算法则只能对两个运动目标中的某一个在正确的位置进行聚焦.

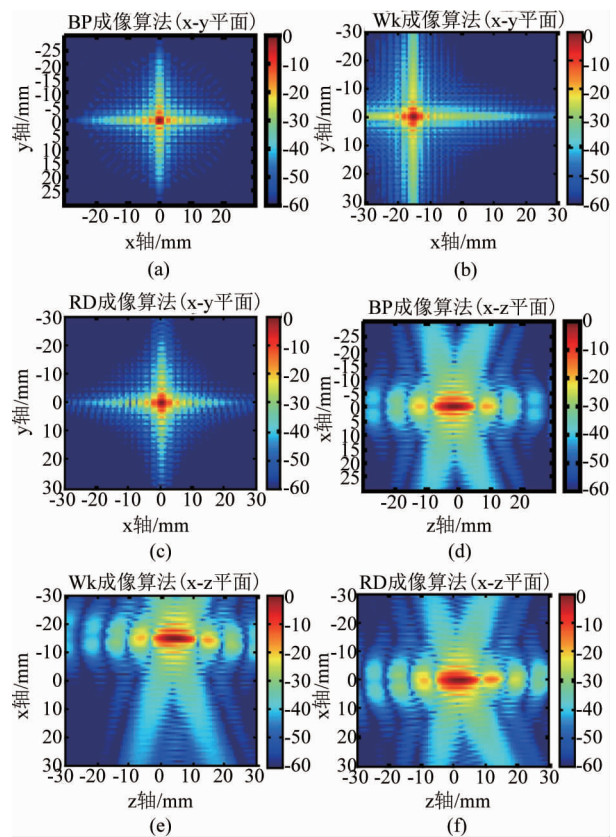


图7 点目标1的成像结果
Fig. 7 Imaging results of point target 1

4.4 基于实测数据的三种算法成像结果分析

为进一步对三种算法进行比较分析,利用全息成像实验系统获取的实验数据,对手枪进行成像. 系统发射的波形为线性调频信号,工作频率为0.14 THz,信号带宽为5 GHz,阵面大小为0.1 m * 0.1 m,天线阵面离目标的距离为0.25 m. 目标的光学图像如图9所示,成像结果如图10所示. BP算法

难度,假设目标的速度及位置均已知,BP算法在每

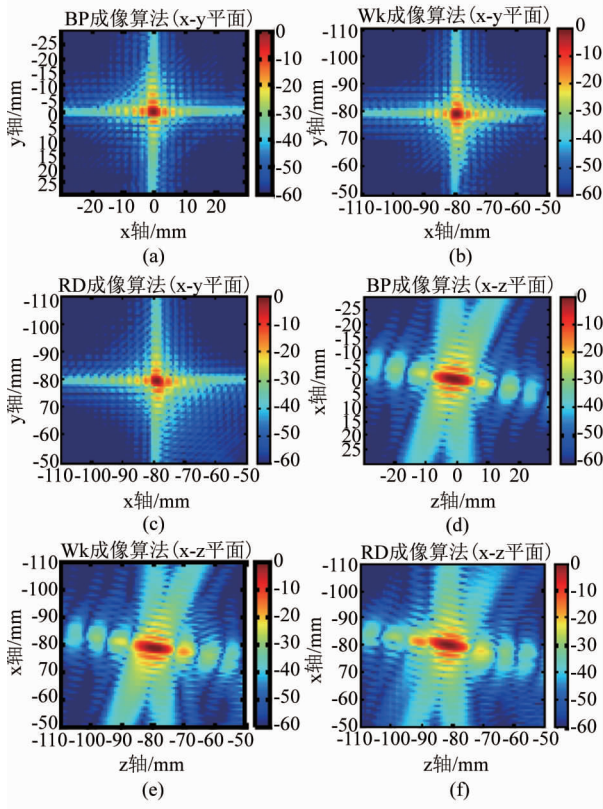


图8 点目标2的成像结果
Fig. 8 Imaging results of point target 2

的成像结果较算法、RD算法更为清晰.从三维成像花费的时间来看,在CPU为i5-3470,操作系统为win7的计算机上,用matlab2011进行运算,RD算法

用的时间约为10 s, ωK 算法的时间约为60 s,BP算法的时间约为1 200 s.表明距离多普勒域成像算法在快速成像上具有明显的优势.



图9 枪的光学图像
Fig. 9 Optical image of handgun

5 结论

全息雷达成像具有无健康危害问题、穿透特性良好、灵敏度高、动态范围大、成像距离远等优点.与金属检测器、后向X射线成像等检测手段相比,全息雷达成像系统在公共安全、反走私等人体隐藏目标检测中有潜在的优势.但是,现有的全息雷达成像系统尚存在多运动目标补偿及快速成像能力不足的问题,限制了其在多运动目标快速成像场景(如火车站等人流量大的场景)中的应用.而本文提出的基于距离多普勒概念的全息雷达成像方法具有成像速度快、运动补偿方便的优点,弥补了现有成像算法的不足.采用距离多普勒全息雷达成像算法,不仅可以同时对多运动目标进行补偿及成像,而且成像速

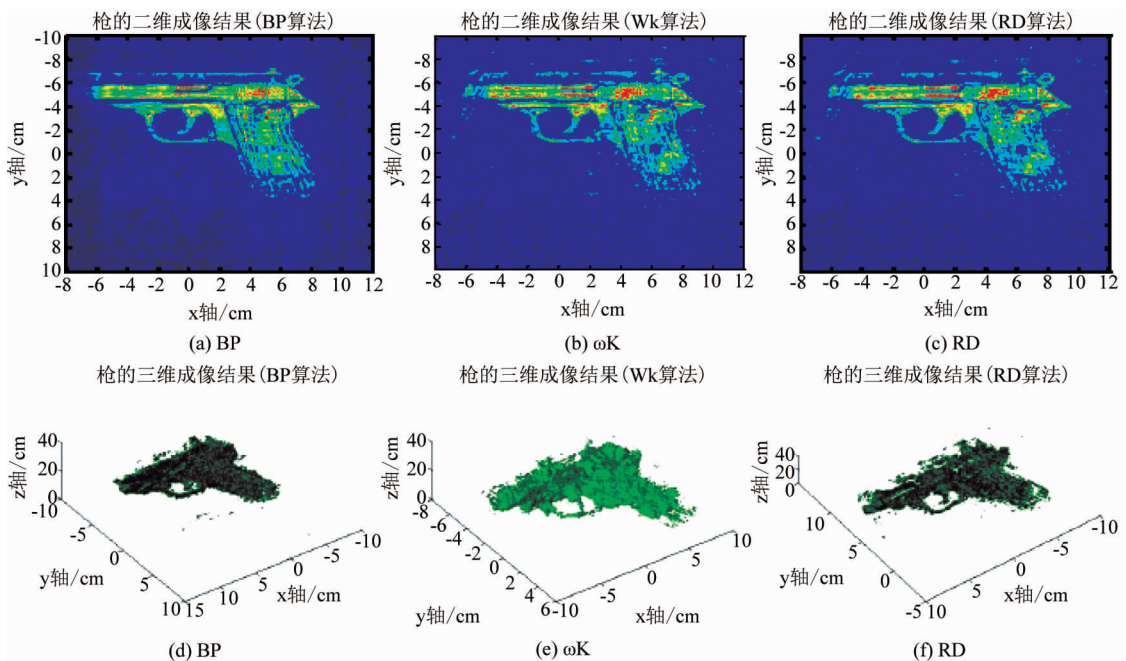


图10 枪的实测数据成像结果
Fig. 10 Holographic images of handgun

度也有大幅的提高(在 4.4 节的场景中,成像速度大约提高了 6 倍).该成像方法具有独特的优势,值得对其进行更深入的研究.下一步将研究该成像方法在菲涅耳区的目标运动补偿及成像算法.

附录

设发射信号为线性调频信号时,目标回波信号 $s_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t)$ 的表达式可写为:

$$S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t) = \iiint \exp\left\{2\pi f_0\left(t - \frac{2R}{c}\right) + \pi K_r\left(t - \frac{2R}{c}\right)^2\right\} \cdot \sigma(x, y, z) dx dy dz \quad (10)$$

按照图 2 给出的推导流程,通过多次应用驻定相位原理(POSP),获得了目标回波在距离多普勒域的表达式 $S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t)$,流程如式(10-16)所示.

$$S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, f_r) = \int s_r(k_{x'}, k_{y'}, d, t) \cdot \exp(-j2\pi f_r t) dt$$

$$\stackrel{\text{POSP}}{=} \iiint \sigma(x, y, z) \exp\left\{-j\frac{4\pi(f_0 + f_r)R}{c}\right\} \exp\left\{-j\frac{\pi f_r^2}{K_r}\right\} dx dy dz \quad (11)$$

$$S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, f_r) = \int s_r(x', y', d, f_r) \cdot \exp(-jk_{x'} x') dx' \stackrel{\text{POSP}}{=} \iiint \exp\left\{-j\sqrt{(y-y')^2 + (z-d)^2} \sqrt{4\frac{[2\pi(f_0 + f_r)]^2}{c^2} - k_{x'}^2}\right\} \sigma(x, y, z) \exp\{-jk_{x'} x'\} \exp\left\{-j\frac{\pi f_r^2}{K_r}\right\} dx dy dz \quad (12)$$

$$S_r(k_{x'}, k_{y'}, d, f_r) = \int s_r(k_{x'}, y', d, f_r) \cdot \exp(-j2\pi k_{y'} y') dy'$$

$$\stackrel{\text{POSP}}{=} \iiint \exp\left\{-j(z-d) \sqrt{4\frac{[2\pi(f_0 + f_r)]^2}{c^2} - k_{x'}^2 - k_{y'}^2}\right\} \sigma(x, y, z) \exp\{-j(k_{x'} x + k_{y'} y)\} \exp\left\{-j\frac{\pi f_r^2}{K_r}\right\} dx dy dz \quad (13)$$

令 $k_{z'} = \sqrt{4\{[2\pi(f_0 + f_r)]/c\}^2 - k_{x'}^2 - k_{y'}^2}$, 则式(12)可简化为

$$S_r(k_{x'}, y', d, f_r) = \exp(jdk_{z'}) \text{FT}_{3D}[\sigma(x, y, z)] \exp\left(-j\frac{\pi f_r^2}{K_r}\right) \quad (14)$$

对 $S_r(k_{x'}, y', d, f_r)$ 进行距离向傅立叶逆变换,可得到 $S_r(k_{x'}, y', d, t)$.

$$S_r(k_{x'}, y', d, t) = \int S_r(k_{x'}, y', d, f_r) \cdot \exp(j2\pi f_r t) df_r$$

$$= \text{FT}_{3D}[\sigma(x, y, z)] \int \exp\left\{j\left(dk_{z'} - \frac{\pi f_r^2}{K_r} + 2\pi f_r t\right)\right\} df_r \quad (15)$$

为了避免烦琐的代数处理,改写传播因子并进行泰勒级数展开,得到:

$$\exp(jdk_{z'}) = \exp\left(jd \sqrt{4\left[\frac{2\pi(f_0 + f_r)}{c}\right]^2 - k_{x'}^2 - k_{y'}^2}\right)$$

$$= \exp\left(j\frac{4\pi f_0 d}{c} \sqrt{D^2(k_{x'}, k_{y'}) + \frac{2f_r}{f_0} + \frac{f_r^2}{f_0^2}}\right)$$

$$\approx \exp\left\{j\frac{4\pi f_0 d}{c} \left[D + \frac{f_r}{2\pi f_0 D} - \frac{f_r^2}{4\pi f_0^2 D^3} \frac{c^2(k_{x'}^2 + k_{y'}^2)}{4f_0^2}\right]\right\}$$

$$\text{其中, } D(k_{x'}, k_{y'}) = \sqrt{1 - \frac{c^2(k_{x'}^2 + k_{y'}^2)}{4f_0^2}} \quad (16)$$

将式(15)代入式(14),通过驻定相位原理,最终得到 $S_r(k_{x'}, y', d, t)$ 的表达式:

$$S_r(k_{x'}, y', d, t) = \text{FT}_{3D}[\sigma(x, y, z)] \exp\left(-j\frac{4\pi d D(k_{x'}, k_{y'}) f_0}{c}\right) \exp\left\{j\pi \frac{K_r}{1 - K_r Z} \left[t - \frac{2d}{cD(k_{x'}, k_{y'})}\right]^2\right\}$$

$$\text{其中, } Z = \frac{cd(k_{x'}^2 + k_{y'}^2)}{2f_0^2 D^3(k_{x'}, k_{y'})} \quad (17)$$

References

- [1] Anderson A. P. Microwave holography[J]. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1977, **110**(11): 946-962.
- [2] Collins H D. Real-time holographic surveillance system [S]. United States Patent, 1995, OSTI ID: 870096.
- [3] David M, Sheen Douglas L, McMakin Thomas E. Hall. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 2001, **49**(9): 1581-1592.
- [4] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Cylindrical millimeter-wave imaging technique and applications[C]. *Passive Millimeter-Wave Imaging Technology IX*, 2006.
- [5] McMakin D L, Keller P E, Sheen D M, et al. Dual surface dielectric depth detector for holographic millimeter-wave security scanners[C]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2009, **7309**(2).
- [6] Sheen D M, Fernandes J L, Tedeschi J R, et al. Wide-bandwidth, wide-beamwidth, high-resolution, millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[C]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2013, **8715**(26).
- [7] Sheen D M, Hall T E. Near-field three-dimensional radar imaging techniques and applications[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(19): E83-E93.
- [8] Sherif Sayed Ahmed, Andreas Schiessl, Frank Gumbmann, et al. Advanced microwave imaging[J]. *IEEE microwave magazine*, 2012, Sep/Oct: 26-43.
- [9] Sebastian Bertl, Detlefsen J. Effects of a reflecting background on the results of active MMW SAR imaging of concealed objects[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(10): 3745-3752.
- [10] Amineh R K, Ravan M, Khalatpour A, et al. Three-dimensional near-field microwave holography using reflected and transmitted signals[J]. *IEEE Transactions on Anten-*

- nas and Propagation*, 2011, **59**(12): 4777–4789.
- [11] Xiaodong Zhuge, Alexander G. Yarovoy. A sparse aperture MIMO-SAR-based UWB imaging system for concealed weapon detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(1): 509–518.
- [12] Xiaodong Zhuge, Alexander G. Yarovoy. Study on two-dimensional sparse MIMO UWB arrays for high resolution near-field imaging[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, **60**(9): 4173–4182.
- [13] Jinshan Ding, Matthias Kahl, Otmar Loffeld, et al. THz 3-D image formation using SAR techniques; simulation, processing and experimental results[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, **3**(5): 606–616.
- [14] WEN Xin, HUANG Pei-Kang, NIAN Feng, et al. Active millimeter-wave near-field cylindrical scanning three-dimensional imaging system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, (温鑫, 黄培康, 年丰, 等. 主动式毫米波近距圆柱扫描三维成像系统[J]. *系统工程与电子技术*), 2014, **36**(6): 1044–1049.
- [15] WEN Xin, HUANG Pei-Kang, NIAN Feng, et al. Channel equalization method of near range wideband CSAR imaging system[J]. *Modern Defence Technology*, (温鑫, 黄培康, 年丰, 等. 一种近距离宽带 CSAR 成像系统通道均衡方法[J]. *现代防御技术*), 2015, **43**(2): 89–95.
- [16] GU Sheng-Ming, LI Chao, GAO Xiang, et al. Three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz gaussian beam—theory and experiment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, **51**(4): 1–9.
- [17] TAN Wei-Xian, HONG Wen, WANG Yan-Ping, et al. Three-dimensional microwave imaging algorithm for the surface of the human body based on wavenumber domain integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, (谭维贤, 洪文, 王彦平, 等. 基于波数域积分的人体表面微波三维成像算法研究[J]. *电子与信息学报*), 2009, **31**(11): 2541–2545.
- [18] ZHU Rong-Qiang, ZHOU Jian-Xiong, FU Qiang. Dimension-reduced time domain correlation algorithm for 3-D cylindrical array imaging[J]. *Journal of Signal Processing*, (朱荣强, 周剑雄, 付强. 柱面阵三维成像的降维时域相关法. *信号处理*), 2016, **32**(7): 779–786.
- [19] REN Bai-Ling. Research on active millimeter-wave imaging algorithms and system for security inspection [D]. Beijing Institute of Technology, 2014. (任百玲, 主动毫米波安检成像算法及系统研究. 北京理工大学博士论文), 2014.
- [20] MENG Xiang-Xin, HU Wei-Dong, SUN Yu, et al. 220 GHz radar imaging system based on wavenumber domain algorithm[J]. *Journal of Microwaves*, (孟祥新, 胡伟东, 孙昱, 等. 基于波数域算法的 220GHz 雷达成像技术[J]. *微波学报*), 2015, (S1): 23–25.
- [21] QIAO Ling-Bo, WANG Ying-Xin, ZHAO Zi-Ran, et al. Spatial sampling for millimeter-wave holographic imaging [J]. *J Tsinghua Univ(Sci & Technol)*, (乔灵博, 王迎新, 赵自然, 等. 毫米波全息成像的空间采样条件[J]. *清华大学学报(自然科学版)*), 2014, **54**(11): 1407–1411.
- [22] WANG Ben-Qin. Near range millimeter wave imaging technology and its signal processing [D]. Nanjing Institute of Technology, (王本庆. 近程毫米波成像技术及其信号处理. 南京理工大学博士论文), 2010.
- [23] LI Liang, MIAO Jun-Gang, JIANG Yue-Song. Near-field three-dimensional radar synthetic aperture imaging based on stolt interpolation [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, (李亮, 苗俊刚, 江月松. 基于 Stolt 插值的近场三维雷达成像孔径成像. *北京航空航天大学学报*), 2006, **32**(7): 815–818.
- [24] CAO Zhen-Xin, DOU Wen-bin, SU Hong-Yan. Millimeter wave holographic imaging radar system using single irradiator at center of scan aperture [J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, (曹振新, 窦文斌, 苏宏艳. 发射天线固定的点频毫米波全息成像雷达系统. *东南大学学报(自然科学版)*), 2011, **41**(4): 678–681.
- [25] HU Chu-Feng, ZHOU Zhou, LI Nan-Jing, et al. Study on three-dimensional imaging time-domain algorithm based on planar scanning mode [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, (胡楚锋, 周州, 李南京, 等. 一种时域平面扫描三维成像算法研究. *仪器仪表学报*), 2012, **33**(4): 764–768.
- [26] 刘 杰, 邓贤进, 成彬彬, 等. 太赫兹近场人体安检成像原理系统与实验验证 [J], *警察技术*, 2016, (3): 22–25.
- [27] SUN Xin, LU Bi-Ying, ZHANG Lan-Zhi, et al. Channel construction and moving target imaging for UWB MIMO through-the-wall radar [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, (孙鑫, 陆必应, 张澜子, 等. 超宽带 MIMO 穿墙雷达信道建模与运动目标成像. *电子与信息学报*), 2014, **36**(8): 1946–1953.
- [28] Andreas Schmidt, Sherif Sayed Ahmed, Andreas Genghammer, et al. A technology demonstrator for a 0.5 m × 0.5 m fully electronic digital beamforming mm-Wave imaging system [C]. *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2011: 2606–2609.
- [29] John Hunt, Jonah Gollub, Tom Driscoll, et al. Metamaterial microwave holographic imaging system [J]. *Optical Society of America*, 2014, **31**(10): 2109–2119.
- [30] Sherif Sayed Ahmed, Andreas Genghammer, Andreas Schiessl, et al. Fully electronic E-band personnel imager of 2 m² aperture based on a multistatic architecture [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, **61**(1): 651–657.
- [31] Wu C. A digital system to produce imagery from SAR data [C]. *In AIAA Conference: System Design Driven by Sensor*, 1976.
- [32] GU Sheng-Ming, LI Chao, GAO Xiang, et al. Three-dimensional terahertz-wave holographic imaging based on mixed-domain reconstruction algorithm [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, (谷胜明, 李超, 高翔, 等. 三维混合域重建算法在太赫兹全息成像中的应用. *强激光与粒子束*), 2013, **25**(6): 1545–1548.
- [33] WANG Jun-Yi, LAO Bao-Qiang, WANG Jin-Qing, et al. Two-dimensional short-range microwave holography imaging algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, (王俊义, 劳保强, 王锦清, 等. 二维近程微波全息成像算法. *系统工程与电子技术*), 2014, **36**(12): 2348–2355.
- [34] ZHU Li, LI Xing-Guo, WANG Ben-Qing. Short-range millimeter wave holographic imaging algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, (朱莉, 李兴国, 王本庆. 近程毫米波全息成像算法. *系统工程与电子技术*), 2011, **33**(12): 2577–2581.