

# 逐点扫描毫米波全息成像雷达的建模仿真分析

夏继钢 汤燕

(中电科技扬州宝军电子有限公司, 江苏 扬州 225003)

**摘要** 基于菲涅耳衍射理论建立了毫米波全息成像雷达理论模型, 确定了照射源、传输空间、目标后向散射系数、散射传输空间和接收复数信号之间的关系, 根据该理论模型利用接收的复数信号反演计算出目标图像。基于傅里叶光学角谱理论, 采用 Matlab 程序针对该毫米波全息成像雷达理论模型进行了编程计算。该仿真程序可以仿真计算系统中各种因素对成像质量的影响, 包括发射天线增益方向图、接收天线方向增益图和目标散射特性等。利用该仿真程序可以优化系统中的各项参数, 为实际设计毫米波全息成像系统提供帮助。

**关键词** 成像系统; 电磁场与微波技术; 毫米波雷达; 全息成像; 建模仿真

中图分类号 O438.1

OCIS 070.0070 090.0090 110.0110

文献标识码 A

## Theory Modeling, Simulation and Analysis on Millimeter Wave Holographic Imaging Radar Based on Point Scanning Mode

Xia Jigang Tang Yan

(Yangzhou Baojun Radio Factory, China Electronics Technology Group Corporation, Yangzhou, Jiangsu 225003, China)

**Abstract** Based on the Fresnel diffraction theory, a theoretical model of the millimeter wave holographic imaging radar is developed, in which the relationship about the irradiator, transition space, object back scattering coefficient, back scattering transition space and the received complex data is created. Using the model, the object image can be obtained. A simulation program is presented by the Matlab program based on the Fourier optics angle spectrum theory, which can be used to analyze the effect of each factor on the imaging quality and help design realistic radar system.

**Key words** imaging systems; electromagnetic field and microwave technique; millimeter wave radar; holographic imaging; modeling and simulation

### 1 引言

毫米波波长介于 1~10 mm 之间, 整个毫米波波段具有四个较好的大气传输窗口即以 35, 94, 140 和 220 GHz 为中心的波段。相比于低频段的微波成像, 毫米波波长短, 成像分辨率高, 成本高; 相比于光学和红外成像, 毫米波成像系统能够探测藏匿在衣物内或衣物中的武器以及违禁物品、大雾天气下的目标等, 但清晰度要远低于光学成像<sup>[1,2]</sup>。因此光学、红外、毫米波和微波成像各有优缺点, 在应用中主要取决于实际情况。显然, 对于藏匿武器等的违禁物品、大雾天气下的目标探测需要达到可以辨析形状的清晰度时, 采用毫米波成像系统比较合适<sup>[1~11]</sup>。

根据成像系统是否采用照射源, 毫米波成像系统可以分为主动和被动两种模式; 根据是否采用相干体制, 主动毫米波成像系统可以分为相干模式和非相干模式, 其中相干模式即是全息系统<sup>[3,4]</sup>。相比于其他形式的毫米波成像系统, 对于近距离探测违禁物品, 毫米波全息成像系统具有显著优势, 可以有效探测并对这些违禁物品成像, 提高机场、银行等重要部门的安全<sup>[6,7]</sup>。

然而, 采用毫米波或者更短波长如太赫兹信号来实现高速全息成像, 需要  $N \times N$  个收发单元 ( $N$  一般要求大于 64) 才能具有比较好的成像效果。众所周知, 如此高频率的器件, 无论是信号源、功放, 还是低噪放、

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-01

作者简介: 夏继钢(1973—), 男, 工程师, 本科, 从事电磁场与微波技术领域的工作。E-mail: baobao-020521@163.com

混频器,都很昂贵,因此在设计这种设备时,需要建立比较理想的系统模型进行仿真,以最大程度地为实际构造系统提供指导。

为此,本文针对毫米波全息成像系统,利用菲涅耳衍射理论和傅里叶光学理论<sup>[12]</sup>,建立了毫米波全息成像雷达模型,利用该模型可以有效地分析多种影响成像质量的因素,为实际设计毫米波全息成像雷达提供帮助。

## 2 全息成像雷达模型

根据毫米波全息成像雷达的基本工作过程,构建了如图 1 所示的模型,左边为扫描孔径,该扫描孔径由  $N \times N$  个单元组成,在该孔径上有一对毫米波段收发组件,发射部分用于照射右边目标孔径上的目标,接收部分用于接收目标后向散射信号,该对毫米波收发组件在扫描孔径上完成  $N \times N$  次扫描,收集到  $N \times N$  组数据后通过成像算法实现目标成像。而对于高速成像雷达,则需要在扫描孔径上放置  $N \times N$  组毫米波收发组件。

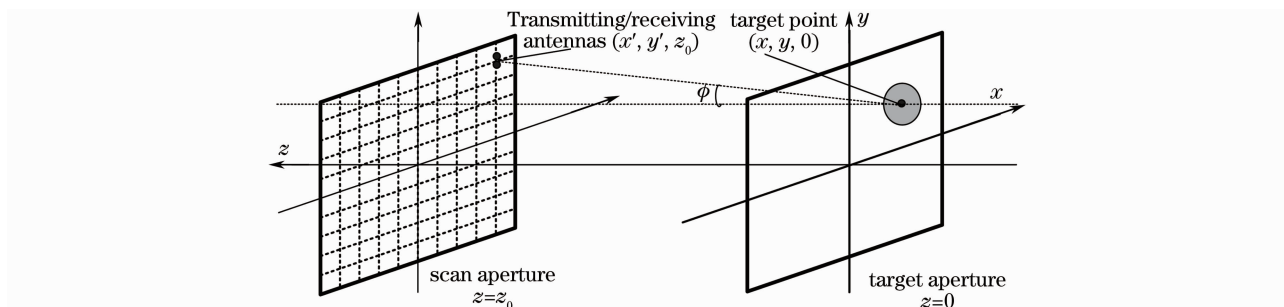


图 1 毫米波全息成像系统模型

Fig. 1 Model of millimeter wave holographic imaging system

设扫描孔径上定照射信号为各向同性信号  $u_0(x'_0, y'_0, z_0)$ , 经过距离  $z_0$  辐射到目标孔径上, 根据傅里叶光学理论, 相当于该信号经过了一个空间滤波器  $h_0(x'_0, y'_0, x, y)$ , 考虑到发射天线的电场方向性  $f_1(\theta, \varphi)$ , 真正作用到目标孔径上的电磁波为  $u_1(x, y, 0)$ , 经过目标后向散射系数  $\sigma(x, y, 0)$  作用后形成信号  $u_2(x, y, 0)$ , 再次考虑到接收天线的电场方向性  $f_1(\theta, \varphi)$ , 该信号经过目标后向散射在  $h_1(x'_0, y'_0, x, y)$  的作用下到达扫描孔径后为  $u_3(x'_0, y'_0, z_0)$ 。在二维扫描全息系统中对该辐射信号, 在扫描孔径上和辐射信号  $u_0(x'_0, y'_0, z_0)$  进行混频滤波, 最终抽样记录得到  $u_4(x'_0, y'_0, z_0)$ , 最后根据扫描孔径上记录的数据进行反演计算获得目标反射系数  $\sigma(x, y, 0)$ , 实现目标全息成像。根据菲涅耳衍射理论、傅里叶光学角谱理论和线性系统理论, 各信号之间的关系为

$$u_1(x, y, 0) = u_0(x'_0, y'_0, z_0) \otimes h_0 \cdot f_1(\theta, \varphi), \quad (1)$$

$$u_2(x, y, 0) = u_1(x, y, 0) \cdot \sigma(x, y, 0), \quad (2)$$

$$u_3(x'_0, y'_0, z_0) = u_2(x, y, 0) \cdot f_2(\theta, \varphi) \otimes h_1, \quad (3)$$

$$u_4(x'_0, y'_0, z_0) = \delta(x - x'_0) \delta(y - y'_0) \cdot \text{Filter}[u_3(x'_0, y'_0, z_0) \cdot u_0(x'_0, y'_0, z_0)]. \quad (4)$$

式中符号  $\otimes$  表示二维卷积计算,  $h_0$  和  $h_1$  实际上是传输距离为  $z_0$  点扩展函数。为减少仿真中的计算量, 假定接收天线和发射天线为全向型, 目标表面足够粗糙, 使得目标后向散射信号仍是各向同性辐射。换言之, (1) ~ (3) 式中的  $f_1(\theta, \varphi)$  和  $f_2(\theta, \varphi)$  均为 1,  $\sigma(x, y, 0)$  与入射角无关。

## 3 仿真分析

采用 Matlab 作为仿真平台, 照射源  $u_0(x'_0, y'_0, z_0)$  为  $\delta(\xi - x'_0, \eta - y'_0, z_0)$ , 该式中的时间因子  $\exp(-j\omega t)$  被省略,  $1 \leq \xi \leq N, 1 \leq \eta \leq N$ 。照射源逐点扫描照射目标孔径, 同样目标孔径也被离散为  $N \times N$  个单元。实际系统中,  $N$  一般为 64 或 128, 因此这里  $N$  取 128。设定目标形状为 F, 如图 2 所示, 工作波长为 3 mm。



图 2 目标图形

Fig. 2 Object figure

### 3.1 距离对成像质量的影响

设定矩形孔径边长为  $N$  个波长,距离分别为 120 cm 和 30 cm。当距离为 120 cm 时,在扫描孔径上获取的目标全息图如图 3(a)所示,反演计算出的目标图像如图 3(b)所示;当距离为 30 cm 时,相应的全息图如图 4(a)所示,反演计算出的目标图像如图 4(b)所示。不难发现,距离较近时,成像质量较好,反之则较差。根据菲涅耳衍射理论,随着传播成像距离的加大,照射源发射的信号在目标孔径上的面积变大,而幅度减小;同样由目标后向散射到扫描孔径上的信号面积也变大,幅度变小。

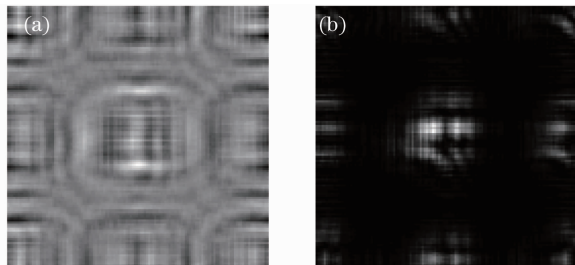


图 3 成像距离为 120 cm 时的全息图(a)和反演目标图像(b)

Fig. 3 Holograph (a) and calculated object image (b) at imaging distance of 120 cm

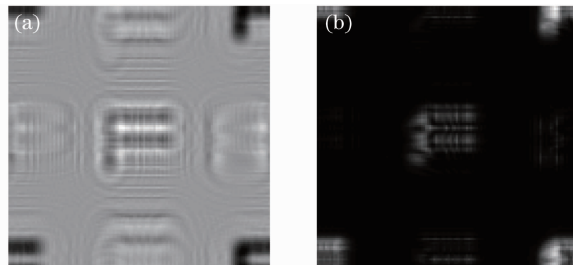


图 4 成像距离为 30 cm 时的全息图(a)和反演目标图像(b)

Fig. 4 Holograph (a) and calculated object image (b) imaging distance of 30 cm

### 3.2 孔径尺寸对成像质量的影响

设定距离为 30 cm,矩形孔径边长分别为  $2 \times N$  个波长和  $N$  个波长。当孔径边长为  $2 \times N$  个波长时,在扫描孔径上获取的目标全息图如图 5(a)所示,反演计算出的目标图像如图 5(b)所示;当孔径为  $N$  个波长时,相应的全息图如图 3(a)所示,反演计算出的目标图像如图 3(b)所示。

比较不同孔径尺寸的成像效果发现,孔径越大,则照射源的孔径也变大,因此辐射强度加大,同时由于接收孔径也较大,可以更加完整地收集目标后向散射数据,只有较少数据会被截断,因此可以获得更为清晰的图像。

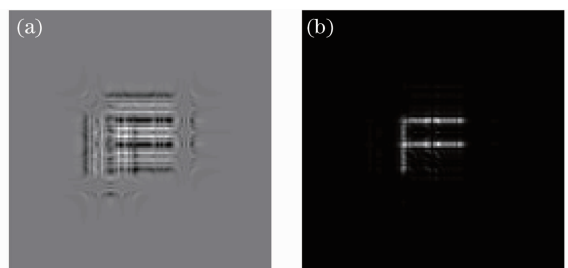


图 5 孔径边长为  $2 \times N$  个波长,距离 30 cm 时的全息图(a)和反演目标图像(b)

Fig. 5 Holograph (a) and calculated object imaging (b) when imaging aperture is  $2 \times N$  wavelengths and imaging distance is 30 cm

### 3.3 系统分辨率仿真

设定成像距离为 30 cm,孔径尺寸为  $2 \times N$  个波长,存在两个矩形目标,直径为一个波长,间隔为 2 个波长,原始目标图如图 6(a)所示,衍射图如图 6(b)所示,反演目标图像如图 6(c)所示。在该条件下,两个准点目标可以较好地分辨出来。如果进一步缩小两个目标的间隔,则反演出来的图像会变得模糊而难以分辨,同时加大成像距离或者减小扫描孔径,均会带来实际分辨率的下降。

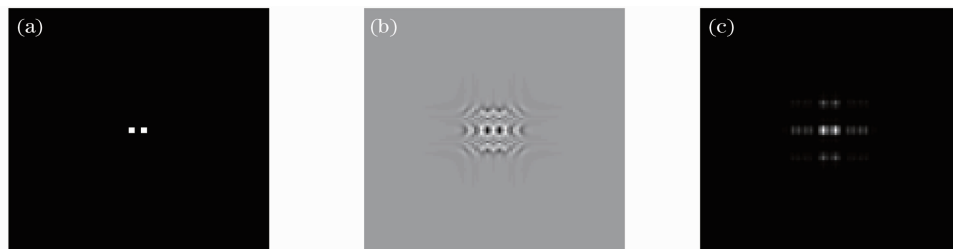


图 6 成像距离为 30 cm,孔径尺寸为  $2 \times N$  个波长时的目标(a),全息图(b)和反演目标图像(c)

Fig. 6 Object (a), holograph (b) and image calculated object (c) when imaging aperture is  $2 \times N$  wavelengths and imaging distance is 30 cm

## 4 结 论

基于菲涅耳衍射理论建立了毫米波全息成像雷达的数学模型,利用傅里叶光学中的角谱理论在 Matlab 平台上建立对应模型的仿真程序。该程序可以用于分析成像距离、空间尺寸、工作波长等多种因素对成像质量的影响,特别是对分辨率的影响。该工作通过理论分析和优化各种参数,为设计实际的毫米波全息成像雷达提供了帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Huaying, Zhao Baoqun, Song Xiufa. Focal depth of the Fresnel digital holographic imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 374~377  
王华英, 赵宝群, 宋修法. 菲涅耳数字全息成像系统的焦深[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 374~377
- 2 Li Junchang. FFT computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1163~1167  
李俊昌. 角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1163~1167
- 3 Wang Nangnan, Qiu Jinghui, Lu Kai *et al.*. Over view of millimeter near field imaging technique[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2008, **5**(1): 6~10  
王楠楠, 邱景辉, 陆凯等. 毫米波近场成像技术综述[J]. *装备环境工程*, 2008, **5**(1): 6~10
- 4 Zhenxin Cao, Wenbin Dou, Hongyan Su. A dual frequencies MMW holographic imaging system[C]. IRMMW, 2009, **30**: 1~2
- 5 Xu Z. Y., Dou W. B., Cao Z. X.. A new algorithm for millimeter-wave imaging processing[C]. CJMW, 2008. 306~308
- 6 D. M. Sheen, D. L. McMakin, T. E. Hall. Near field imaging at microwave and millimeter wave frequencies[C]. *IEEE/MTT-S Int.*, 2007. 1693~1696
- 7 D. M. Sheen, D. L. McMakin, T. E. Hall. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection [J]. *IEEE T. Microw. Theory*, 2001, **49**(9): 1581~1592
- 8 G. Brooker, R. Hennessey, M. Bishop *et al.*. Millimetre wave 3D imaging for industrial applications[C]. The 2nd international conference on wireless broadband and ultra wideband communications, IEEE, 2007. 27
- 9 O. Minin. Quasi-optical mm-wave concealed weapon detection systems: review[C]. Proceedings KORUS, 2003. 60~64
- 10 N. Osumi, K. Ueno. Microwave holographic imaging method with improved resolution[J]. *IEEE T. Antenn. Propag.*, 1984, **32**(10): 1018~1026
- 11 N. H. Farhat, W. R. Uard. Millimeter wave holographic imaging of concealed weapons[J]. *Proc. IEEE*, 1970, **58**(12): 1955~1956
- 12 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. New York: McGraw-Hill, 1968