

# 太赫兹孔径编码成像分辨性能研究

陈 硕 罗成高\* 邓 彬 秦玉亮 王宏强 庄钊文

(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

**摘 要:** 太赫兹孔径编码成像综合了光学孔径编码成像和微波关联成像的基本原理, 通过孔径编码天线改变目标区域太赫兹波空间幅相分布来实现高分辨、高帧率、前视凝视成像。基于孔径编码天线, 该文设计了雷达成像系统和准光扫描光路, 可同时实现系统孔径编码和波束扫描功能, 理论推导并仿真分析了其成像质量影响因素, 并在此基础上比较了不同算法对孔径编码成像分辨性能的影响, 证明了稀疏重构类算法对孔径编码成像的优势, 最后对比了孔径编码成像和同尺寸阵列实孔径成像的结果, 论证出孔径编码成像系统具有高分辨, 易于小型化, 成本较低等优点。该成像方式可广泛应用于战场侦查、安检反恐和末制导等领域。

**关键词:** 太赫兹; 孔径编码; 凝视; 前视

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)01-0127-12

DOI: 10.12000/JR17089

**引用格式:** 陈硕, 罗成高, 邓彬, 等. 太赫兹孔径编码成像分辨性能研究[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 127–138. DOI: 10.12000/JR17089.

**Reference format:** Chen Shuo, Luo Chenggao, Deng Bin, *et al.*. Research on resolution of terahertz coded-aperture imaging[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 127–138. DOI: 10.12000/JR17089.

## Research on Resolution of Terahertz Coded-aperture Imaging

Chen Shuo Luo Chenggao Deng Bin Qin Yuliang

Wang Hongqiang Zhuang Zhaowen

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha 410073, China)

**Abstract:** Terahertz coded-aperture imaging follows the basic principles of optical coded-aperture imaging and microwave coincidence imaging and is a novel imaging technique. Herein, the wave spatial distribution or illumination pattern is usually obtained by a sub-reflector antenna. Terahertz coded-aperture imaging has some significant advantages such as a high frame rate, high resolution, and ability of forward-looking and staring imaging. To achieve simultaneous functions of aperture coding and beam scanning, we designed a terahertz coded-aperture imaging system that utilizes digital sub-reflector antenna and quasi-optical techniques. Based on this system, we deduce and simulate the influencing factors on its resolution. Then, different algorithms are applied to the imaging model in order to verify the superiority of sparse reconstruction for coded-aperture imaging. Finally, we compare the imaging results of our imaging system and that of a traditional real aperture imaging structure for the same simulation parameters. The results prove that our imaging system performs better with high resolution, small volume, and low cost. This new imaging technique can be applied to areas such as battlefield reconnaissance, security checks, anti-terrorism, and terminal guidance.

**Key words:** Terahertz; Coded-aperture; Staring; Forward-looking

收稿日期: 2017-10-19; 改回日期: 2017-12-13; 网络出版: 2018-01-24

\*通信作者: 罗成高 luochenggao@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701513, 61571011)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701513, 61571011)

## 1 引言

雷达高分辨率成像是实现反恐安检、战场侦察、目标探测与识别的重要手段<sup>[1,2]</sup>。传统微波雷达由于波长短和受距离-多普勒成像原理的限制, 无法在前视和凝视条件下高分辨率成像。同时, 光学雷达无法实现全天时、全天候探测。

而太赫兹孔径编码成像既可克服传统微波雷达成像对相对运动的依赖, 又可实现全天时全天候探测。该方法借鉴光学孔径编码成像和微波关联成像的基本原理<sup>[3-7]</sup>, 通过孔径编码的方式在探测区域内形成时空正交的2维随机辐射场, 由2维随机辐射场可推演出参考信号矩阵, 最后将目标散射回波向量与参考信号矩阵进行关联处理, 从而实现对波束内目标信息提取与解耦。

相对于传统雷达, 太赫兹在相同孔径天线条件下结合孔径编码技术, 更易产生多样性的照射模式, 极大提升了雷达高分辨成像的能力<sup>[8-10]</sup>。同时, 系统收发链路简单, 易实现小型化。电控阵列天线空间波调制技术的发展也为实现基于孔径编码天线的太赫兹孔径编码成像雷达提供了有力的器件支持<sup>[3,11-13]</sup>。

本文将对基于孔径编码天线的太赫兹孔径编码成像进行系统结构和准光设计, 同时实现波束时空孔径编码和波束扫描的功能, 理论推导并仿真验证该方法成像质量的主要影响因素, 仿真分析孔径编码成像不同算法对孔径编码成像分辨性能的影响, 最后对比孔径编码成像相对于阵列实孔径成像的优势。有望使太赫兹孔径编码成像应用于反恐安检和战场侦查等领域。

## 2 成像系统设计

### 2.1 雷达系统结构设计

针对安检与反恐等近距成像领域的应用需求, 设计了如图1所示的基于孔径编码天线的太赫兹孔径编码成像系统。该系统主要包括发射天线、接收天线、孔径编码天线、系统控制主机和矢量网络分析仪。

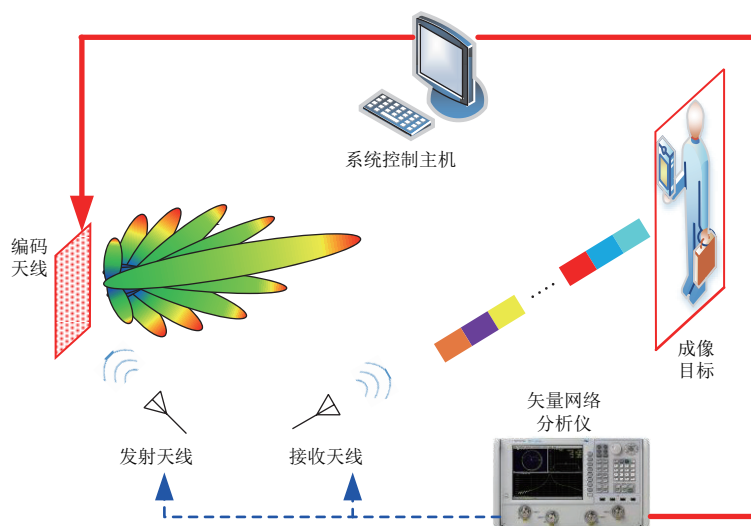


图 1 太赫兹孔径编码成像系统

Fig. 1 System of THz Coded-Aperture Imaging (TCAI)

系统控制主机同时控制孔径编码天线和矢量网络分析仪, 其中矢量网络分析仪通过外接发射、接收天线来收发太赫兹信号; 孔径编码天线在系统控制主机的精确控制下同时加载孔径编码随机移相因子和透镜相位调制因子。一方面, 孔径编码随机移相因子可在孔径编码天线的每个阵元处对入射太赫兹波束进行随机移相, 进而改变目标区域太赫兹波的空间幅相分布; 另一方面, 透镜相位调制因子可使孔径编码天线起到数字透镜的作用, 对太赫兹反射波束进行聚束并对波束指向进行控制。接收天线采集目标表面的散射回波信号并传输至矢量网络分析仪。与此同时, 系统控制主机结合发射信号和成像系统结构参数, 进行辐射场信号推演, 得到参考信号, 将参考信号与回波信号送入系统控制主机进行成像处理, 最终重建出目标的图像。

### 2.2 准光扫描光路设计

为实现透镜相位调制因子对太赫兹反射波束进行聚束并对波束指向进行控制, 使得波束光斑在探测目标表面始终以相同尺寸平移, 实现波束扫描。借鉴扫描光路设计经验<sup>[14-16]</sup>, 设计了如图2所示的准光扫描光路。孔径编码天线的几何尺寸为 $l_h \times l_v$ , 目标平面成像区域尺寸为 $h \times v$ , 发射天线的空间坐标为 $A(x_0, y_0, a)$ , 发射天线与目标平面的水平间距为 $b$ , 目标中心点与坐标原点的斜距为 $R$ , 俯仰角度为 $\theta$ , 水平偏向角度为 $\varphi$ , 目标平面成像区域左下角端点空间坐标为 $B(e_h, e_v, a+b)$ , 目标平面与数字透镜聚焦平面的水平间距为 $d$ 。

根据图中几何关系, 可得:

$$a + b = R \sin \theta \cos \varphi \quad (1)$$

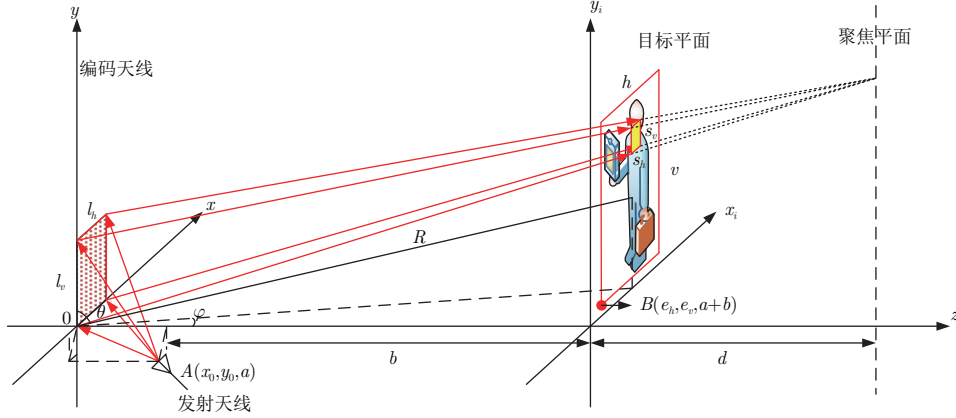


图2 太赫兹孔径编码近距成像系统准光设计

Fig. 2 Quasi-optical design of TCAI

孔径编码天线起到数字透镜的作用, 数字透镜的焦距为 $f$ , 根据透镜成像公式可知聚焦面与目标平面之间的间距为:

$$d = \frac{af}{a-f} - a - b \quad (2)$$

反射太赫兹波束入射至孔径编码天线上, 其指向由透镜相位调制因子调控, 具体参数通过相位中心位置处入射角结合镜面反射定理确定。其中, 第 $m$ 个编码孔径阵元处的透镜相位调制因子为:

$$P_{\text{lens},m} = \exp\left(-j\frac{\gamma}{2f}\left[(x_m-x_0)^2+(y_m-y_0)^2\right]\right) \quad (3)$$

其中,  $\gamma = 2\pi f/c$ ,  $f$  为太赫兹波频率,  $c$  为光速。 $(x_m, y_m)$  为第 $m$ 个编码孔径阵元处的坐标位置,  $(x_0, y_0)$  为编码孔径模拟的数字透镜相位中心位置。

透镜相位调制因子的相位中心位置从孔径编码天线的下端点移至上端(或左端点移至右端点)的过程中, 反射太赫兹波束可对目标实现依次逐块扫描。设反射太赫兹波束在目标表面形成的光斑尺寸为 $s_h \times s_v$ , 则  $s_h, s_v, h, v, e_h$  和  $e_v$  可由下列各式给出:

$$h = \frac{(2a+b)l_h}{a} \quad (4)$$

$$v = \frac{(2a+b)l_v}{a} \quad (5)$$

$$s_h = \frac{dl_h}{a+b+d} \quad (6)$$

$$s_v = \frac{dl_v}{a+b+d} \quad (7)$$

$$e_h = \frac{(a+b)x_0}{a} \quad (8)$$

$$e_v = \frac{(a+b)y_0}{a} \quad (9)$$

根据上述结论, 要使太赫兹光斑在目标表面实现连续但不重复的遍历扫描, 则必须使得每相邻两

个光斑之间实现无缝衔接, 则透镜相位调制因子相位中心位置在孔径编码天线必须以特定步长移动, 沿水平与竖直方向上的移动步长 $D_h$ 和 $D_v$ 分别由以下两式给出:

$$D_h = \frac{a^2 s_h + a d s_h + a b s_h}{2a^2 + 3ab + b^2 + ad + bd} \quad (10)$$

$$D_v = \frac{a^2 s_v + a d s_v + a b s_v}{2a^2 + 3ab + b^2 + ad + bd} \quad (11)$$

### 3 成像模型及分辨性能分析

#### 3.1 成像数学模型

孔径编码成像系统参考微波关联成像采用MT-SR的雷达体制<sup>[6]</sup>。图3给出了直角坐标系下太赫兹孔径编码成像几何示意图。坐标系原点 $O$ , 接收阵元的位置处在原点, 坐标为 $\mathbf{R}_0(0, 0)$ 。 $M$ 个发射天线阵元按照均匀线阵排布, 发射天线阵元的位置为 $\mathbf{R}_m(R_m, \theta_m)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ 。

借鉴关联成像原理, 建立孔径编码成像的参数化数学模型:

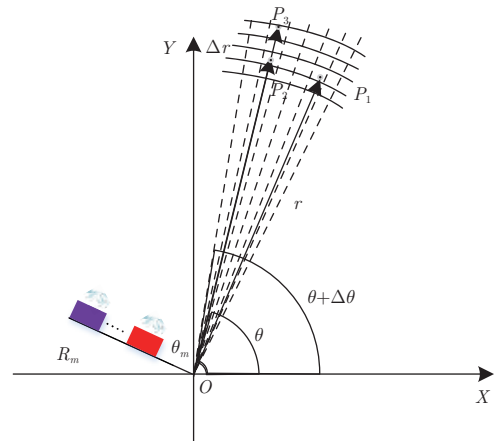


图3 太赫兹孔径编码成像几何示意图

Fig. 3 Schematic diagram of TCAI

$$\mathbf{S}\mathbf{r} = \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{w},$$

$$\begin{bmatrix} \text{Sr}(t_1) \\ \text{Sr}(t_2) \\ \vdots \\ \text{Sr}(t_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(t_1, \mathbf{r}_1) & S(t_1, \mathbf{r}_2) & \cdots & S(t_1, \mathbf{r}_K) \\ S(t_2, \mathbf{r}_1) & S(t_2, \mathbf{r}_2) & \cdots & S(t_2, \mathbf{r}_K) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(t_N, \mathbf{r}_1) & S(t_N, \mathbf{r}_2) & \cdots & S(t_N, \mathbf{r}_K) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w(t_1) \\ w(t_2) \\ \vdots \\ w(t_N) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{S}$  是参考信号矩阵, 定义为  $S(t_n, \mathbf{r}_k) = \sum_{m=1}^M S_m \left( t_n - \frac{|\mathbf{r}_k - \mathbf{R}_m| + |\mathbf{r}_k - \mathbf{R}_0|}{c} \right)$ ,  $S_m(t)$  为对第  $m$  个编码阵元的发射信号,  $t_1, t_2, \dots, t_N$  分别表示  $N$  个采样时刻,  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_K$  分别表示  $K$  个成像网格中心的位置矢量,  $\mathbf{R}_m$  为第  $m$  个发射阵元的位置矢量,  $\mathbf{R}_0$  为接收天线的位置矢量,  $\mathbf{S}\mathbf{r}$  是接收信号矢量,  $\boldsymbol{\sigma}$  是未知的目标散射系数矢量,  $\mathbf{w}$  是噪声矢量。

根据式(11), 孔径编码成像的图像重构问题就变为求解成像方程。可以看出, 参考信号矩阵  $\mathbf{S}$  的性质决定了关联方程求解  $\boldsymbol{\sigma}$  的性能, 理想情况下, 参考信号矩阵的行(下称矩阵行原子)之间和列(下称矩阵列原子)之间是相互完全独立的, 没有噪声的情况下, 目标散射系数  $\boldsymbol{\sigma}$  可以无限精确地求解。但是, 现实中受信号的带宽、调相范围、阵列孔径等因素的影响, 矩阵原子之间总会存在一定的相关性, 因而目标散射系数  $\boldsymbol{\sigma}$  的求解也会受之影响。下面首先分析太赫兹孔径编码成像相对于传统雷达成像的分辨优势, 然后将从秩理论的角度对孔径编码成像分辨质量的影响因素进行理论分析。

### 3.2 分辨性能分析

传统雷达成像单个雷达照射波束为平面波前, 如图4(a), 目标散射点1和目标散射点2方位信息不

同, 但距离信息相同, 到达两目标散射点处的信号没有差异。所有时间采样的雷达接收信号为:

$$\begin{cases} \text{Sr}(t_1) = \sigma_1 S(t_1) + \sigma_2 S(t_1) = (\sigma_1 + \sigma_2) S(t_1) \\ \text{Sr}(t_2) = \sigma_1 S(t_2) + \sigma_2 S(t_2) = (\sigma_1 + \sigma_2) S(t_2) \\ \vdots \\ \text{Sr}(t_N) = \sigma_1 S(t_N) + \sigma_2 S(t_N) = (\sigma_1 + \sigma_2) S(t_N) \end{cases} \quad (13)$$

很明显, 通过式(13)无法解析出目标散射点1和目标散射点2。因此传统雷达成像在同一波前处无方位向分辨信息。

而孔径编码成像中的波前为调制波前, 同一波前面幅度或相位信息随机起伏, 如图4(b)所示, 目标散射点1和目标散射点2处的信号有较大概率存在差异。所有采样时间的雷达接收信号为:

$$\begin{cases} \text{Sr}(t_1) = \sigma_1 S_1(t_1) + \sigma_2 S_2(t_1) \\ \text{Sr}(t_2) = \sigma_1 S_1(t_2) + \sigma_2 S_2(t_2) \\ \vdots \\ \text{Sr}(t_N) = \sigma_1 S_1(t_N) + \sigma_2 S_2(t_N) \end{cases} \quad (14)$$

当  $S_1(t) \neq S_2(t)$  时, 通过式(14), 可求解散射信息  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ 。所以孔径编码成像的在同一波前处的方位向信息可分辨。因此, 孔径编码成像相对于传统雷达成像有原理性的分辨优势。

针对式(12)所示方程组, 方程的个数不能小于待求解未知参数的个数, 即考虑  $N \geq K$ , 这样目标未知参数求解可概括为以下两种情况:

(1)  $\text{rank}(\mathbf{S}) = K$ ;

方程组内独立方程个数等于待求解未知参数个数。当  $N = K$  时, 可直接通过求逆运算求解;  $N > K$ , 可通过求伪逆运算求解。

(2)  $\text{rank}(\mathbf{S}) < K$ ;

独立方程个数少于待求解未知参数个数, 此时无法通过求逆运算求解未知参数向量。

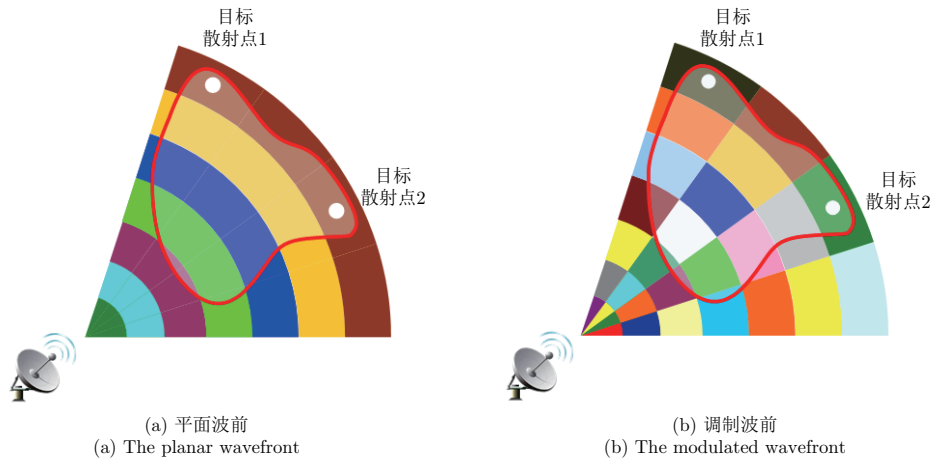


图 4 孔径编码成像高分辨原理

Fig. 4 High-resolution principle of TCAI

情况2可总结为秩缺问题<sup>[17]</sup>, 该情况下无法准确求解未知参数, 且容易受噪声影响。参考信号矩阵 $\mathbf{S}$ 秩缺越严重, 求解的位置参数越不准确, 受噪声的影响越大。理想情况下, 矩阵 $\mathbf{S}$ 的行原子之间和列原子之间完全独立, 不存在秩缺问题。但现实雷达信号处理中, 矩阵原子之间总会存在一定的相关性。这样, 判断式(12)求解的问题就转化为判断参考信号矩阵原子之间相关性的问题。

将参考信号矩阵 $\mathbf{S}$ 表示成列原子形式,

$$\mathbf{S} = [ \mathbf{s}_1 \quad \mathbf{s}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{s}_k \quad \cdots \quad \mathbf{s}_K ] \in \mathbf{R}^{N \times K} \quad (15)$$

其中,

$$\mathbf{s}_k = \left[ S(t_1, \mathbf{r}_k) \quad S(t_2, \mathbf{r}_k) \quad \cdots \quad S(t_N, \mathbf{r}_k) \right]^T \quad (16)$$

其中,  $S(t_n, \mathbf{r}_k) = \sum_{m=1}^M S_m(t_n - \tau_{mk})$ 为 $t_n$ 时刻,  $M$ 个编码孔径阵元反射信号在第 $k$ 个成像单元处的叠加信号,  $\tau_{mk}$ 为第 $m$ 个阵元反射信号经第 $k$ 个成像单元目标反射后到达接收端的传播时延。

假设参考信号矩阵列原子间的相关性用 $\gamma$ 表示, 即

$$\gamma_{\text{space}} = \langle \mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j \rangle \quad (17)$$

其中,  $\langle \cdot \rangle$ 表示原子间的互相关。 $\gamma_{\text{space}}$ 定义为空间相关函数。考虑到不同阵元发射信号之间相互独立, 将反射信号代入上式并简化可得到:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{space}} = \langle \mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j \rangle &= E \left[ \sum_{n=1}^N S(t_n, \tau_i) S^*(t_n, \tau_j) \right] \\ &= E \left\{ \sum_{n=1}^N \left[ \sum_{p=1}^M S_p(t_n - \tau_i) \sum_{q=1}^M S_q^*(t_n - \tau_j) \right] \right\} \\ &= E \left[ \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M S_m(t_n - \tau_{mi}) S_m^*(t_n - \tau_{mj}) \right] \quad (18) \end{aligned}$$

其中,  $S_m(t)$ 为经第 $m$ 个阵元反射的信号,  $\tau_{mi}$ 和 $\tau_{mj}$ 为第 $m$ 个阵元反射信号分别经过第 $i$ 和第 $j$ 个成像单元目标反射后到达接收端的传播时延。

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{space}} &= E \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |a|^2 \exp \left[ j2\pi \left( f_c(t_n - \tau_{mi}) + 0.5\gamma(t_n - \tau_{mi})^2 \right) + \varphi(t_n, m) \right] \right. \\ &\quad \cdot \left. \exp \left[ -j2\pi \left( f_c(t_n - \tau_{mj}) + 0.5\gamma(t_n - \tau_{mj})^2 \right) - \varphi(t_n, m) \right] \right\} \\ &= E \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |a|^2 \exp \left[ j2\pi \left( f_c \Delta \tau_{mji} + 0.5\gamma \Delta \tau_{mji} (2t_n - \tau_{mj} - \tau_{mi}) \right) \right] \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

从上式中可以看出, 当 $\gamma_{\text{space}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \delta(0)$ 为冲击函数叠加时, 原子 $\mathbf{s}_i$ 与 $\mathbf{s}_j$ 完全相关, 此时参考信号矩阵秩数目减少; 当 $\gamma_{\text{space}} = 0$ 时, 原子 $\mathbf{s}_i$ 与 $\mathbf{s}_j$ 完全不相干, 此时参考信号矩阵秩数目增加。由 $\gamma_{\text{space}}$ 可定性分析2维随机辐射场的空间独立性,  $\gamma_{\text{space}}$ 越趋近于零, 空间非相关性越强。

同理, 时间相关函数可表征为:

$$\gamma_{\text{time}} = E \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M S_m(t_x - \tau_{mk}) S_m^*(t_y - \tau_{mk}) \right] \quad (19)$$

其中,  $t_x$ 和 $t_y$ 分别为行原子 $\mathbf{s}^x$ 和 $\mathbf{s}^y$ 对应的快时间, 参考信号矩阵 $\mathbf{S}$ 表示成行原子形式为:

$$\mathbf{S} = [ \mathbf{s}^1 \quad \mathbf{s}^2 \quad \cdots \quad \mathbf{s}^n \quad \cdots \quad \mathbf{s}^N ] \in \mathbf{R}^{N \times K} \quad (20)$$

其中 $\mathbf{s}^n = [S(t_n, \mathbf{r}_1) \quad S(t_n, \mathbf{r}_2) \quad \cdots \quad S(t_n, \mathbf{r}_K)]$ 。

参考 $\gamma_{\text{space}}$ , 通过 $\gamma_{\text{time}}$ 可定性分析2维随机辐射场的时间独立性,  $\gamma_{\text{time}}$ 越趋近于零, 时间非相关性越强。综上 $\gamma_{\text{space}}$ 和 $\gamma_{\text{time}}$ 越趋近于零, 2维随机辐射场的时空非相关性越强, 成像质量越高。

**3.2.1 空间相关性分析** 馈源初始发射信号为线性调频信号:

$$St(t) = a \exp [j2\pi (f_c t + 0.5\gamma t^2)] \quad (21)$$

$f_c$ 为太赫兹中心频率,  $\gamma = 2\pi f_c/c$ 为调频率。

经第 $m$ 个孔径编码天线阵元后, 再通过目标反射后到达接收端的回波信号为(下变频):

$$\begin{aligned} S_m(t, \tau_m) &= a \exp \left\{ -j2\pi \left[ f_c \tau_m + 0.5\gamma(t - \tau_m)^2 \right] \right. \\ &\quad \left. + \varphi(t, m) + \varphi_l(t, m) \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

其中,  $\varphi(t, m)$ 和 $\varphi_l(t, m)$ 分别是第 $k$ 个孔径编码阵元的随机移相因子和透镜相位调制因子。波束指向不变, 分析信号时空非相关性, 假定 $\varphi_l(t, m) = 0$ 。

根据式(18)、式(22), 空间相关函数进一步表征为:

其中,  $\Delta\tau_{mji} = \tau_{mj} - \tau_{mi}$

设初始时刻为  $t_0 = 0$ , 采样时间间隔为  $t_s = 1/f_s$ , 则有  $t_n = t_0 + nt_s = nt_s$ 。在远场条件

下, 因为  $\tau_{mi} \approx \tau_{mj}$ , 可近似认为  $\tau_{mi} = \tau_{mj} = \tau_{\text{ref}}$ , 为编码孔径与成像平面的时延。化简式(23)可得:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{space}} &= E \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |a|^2 \exp [j2\pi ((f_c - \gamma\tau_{\text{ref}}) \Delta\tau_{mji} + n\gamma t_s \Delta\tau_{mji})] \right\} \\ &= E \left\{ \sum_{m=1}^M |a|^2 N \frac{\sin(N\pi\gamma t_s \Delta\tau_{mji})}{N \sin(\pi\gamma t_s \Delta\tau_{mji})} \exp \left[ j2\pi \left( \left( f_c - \gamma\tau_{\text{ref}} + \frac{N+1}{2} \gamma t_s \right) \Delta\tau_{mji} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

且因为  $N$  数目较多,  $\pi\gamma t_s \Delta\tau_{mji}$  项数目较小, 故式(21)可进一步化简为:

$$\gamma_{\text{space}} = E \left\{ \sum_{m=1}^M |a|^2 N \text{sinc}(N\gamma t_s \Delta\tau_{mji}) \exp \left[ j2\pi \left( \left( f_c - \gamma\tau_{\text{ref}} + \frac{N+1}{2} \gamma t_s \right) \Delta\tau_{mji} \right) \right] \right\} \quad (25)$$

可见, 空间非相关性对应  $M$  个阵元空间相关函数的和, 单个阵元函数的幅度部分可以用辛格函数表示。由辛格函数的性质可知, 空间非相关性与时间采样次数、线性调频系数、时间采样间隔和成像阵元间隔成正比。

设孔径编码天线的阵元线性均匀排列, 且阵元的径向间距设为  $d$ , 第 1 个阵元到两成像单元的时延差为  $\Delta\tau_{ji}$ , 那么第  $m$  个阵元到两成像单元的时延差  $\Delta\tau_{mji} = \Delta\tau_{ji} + (m-1)d$  ( $m=2,3, \dots, M$ )。该条件下, 式(23)还可化简为:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{space}} &= E \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |a|^2 \exp [j2\varphi_f (\Delta\tau_{ji} + (m-1)d)] \right\} \\ &= E \left\{ \sum_{n=1}^N |a|^2 M \cdot \frac{\sin(M\varphi_f d)}{M\varphi_f d} \exp [j\varphi_f (2\Delta\tau_{ji} + (M-3)d)] \right\} \\ &\approx E \left\{ \sum_{n=1}^N |a|^2 M \cdot \text{sinc}(M\varphi_f d) \exp [j\varphi_f (2\Delta\tau_{ji} + (M-3)d)] \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

其中,  $\varphi_f = \pi[f_c + \gamma(nt_s - \tau_{\text{ref}})]$ , 由辛格函数的性质可知, 空间非相关性与雷达载频、天线阵元个数和阵元间距成正比, 与目标和雷达的距离成反比。

**3.2.2 时间相关性分析** 同理进一步展开时间非相关性的函数表达式:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{time}} &= E \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M |a|^2 \exp \left[ j2\pi \left( f_c (t_x - \tau_{mk}) + 0.5\gamma (t_x - \tau_{mk})^2 \right) + \varphi(t_x, m) \right] \right. \\ &\quad \left. \cdot \exp \left[ -j2\pi \left( f_c (t_y - \tau_{mk}) + 0.5\gamma (t_y - \tau_{mk})^2 \right) - \varphi(t_y, m) \right] \right\} \\ &= E \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M |a|^2 \exp [j2\pi (f_c \Delta t_{xy} + 0.5\gamma \Delta t_{xy} (2\tau_{mk} - t_x - t_y))] \exp [\varphi(t_x, m) - \varphi(t_y, m)] \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

其中,  $\Delta t_{xy} = t_x - t_y$ 。在远场条件下, 可近似认为  $\tau_{mk} = \tau_{\text{ref}}$ , 式(27)可化简为:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{time}} &= E \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M |a|^2 \exp [j2\pi (f_c \Delta t_{xy} + 0.5\gamma \Delta t_{xy} (2\tau_{\text{ref}} - t_x - t_y))] \exp [\varphi(t_x, m) - \varphi(t_y, m)] \right\} \\ &= E \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M |a|^2 \exp (j\varphi_c) \cdot \exp [\varphi(t_x, m) - \varphi(t_y, m)] \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

其中,  $\varphi_c = \pi \left[ f_c \Delta t_{xy} + \frac{1}{2} \gamma \Delta t_{xy} (2\tau_{\text{ref}} - t_x - t_y) \right]$  为常数相位部分。上式相位第2部分为相同阵元不同时间的相位差, 所以参考信号矩阵的时间非相关性与孔径编码天线的调相能力有关。事实上, 孔径编码天线的随机调相范围越大, 信号的时间非相关性越强。

#### 4 成像模型及分辨性能分析

该部分仿真采用线性调频信号, 采用3.2节的分析方法对太赫兹孔径编码成像分辨性能进行分析。

基于式(12)所示的成像方程, 可以将孔径编码成像方法大致分为匹配滤波法、最小二乘法、正则化方法和稀疏重构法。在雷达成像中, 稀疏性是最常见的先验信息。雷达孔径编码成像模型与稀疏重构成像模型存在天然的一致性, 充分利用这一先验信息可以大大提高雷达成像质量。现在已经有严格的数学证明, 若  $\sigma$  稀疏, 以下优化问题能准确求解  $\sigma$ 。

$$\hat{\sigma} = \arg \min_{\sigma} \|\sigma\|_0, \text{ s.t. } \|\mathbf{S}\mathbf{r} - \mathbf{S} \cdot \sigma\|_2^2 < \varepsilon \quad (29)$$

其中,  $\varepsilon$  表示与噪声相关的误差允许量。式(29)中的最小  $l_0$  范数问题是一个NP-hard问题, 通过不同的近似处理能够很好地解决该问题。本文采用典型的稀疏重构算法正交匹配追踪 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 方法和匹配滤波法、最小二乘法、正则化方法等进行成像比较。最后在相同的系统参数条件下将本文的孔径编码成像方法和传统的阵列实孔径方法进行对比, 进一步阐述孔径编码成像方法的优越性。

本节仿真主要参数如表1所示。

##### 4.1 信号波形对成像分辨性能的影响

信号波形对成像质量的影响, 主要表现在信号的调相范围、线性调频系数、时间采样间隔、时间采样次数和载频。

如图5和图6所示分别为不调相,  $[-\pi/2 \ \pi/2]$  范围内调相和  $[-\pi \ \pi]$  范围内调相的空间相关度和时间相关度结果, 其他参数参考表1。由图可知, 随着

表 1 成像基本参数

Tab. 1 The basic imaging parameters

参数	取值
孔径编码天线阵元数量	20×20
孔径编码天线阵元边长 $l_h \times l_v$	0.02 m×0.02 m
孔径编码天线边长	0.3 m×0.3 m
信号振幅 $A$	1
信号中心频率 $f_c$	340 GHz
信号线性调频系数 $k$	$5 \times 10^{12}$
随机调相范围	$[-\pi/2 \ \pi/2]$
采样间隔 $t_s$	$2 \times 10^{-6}$ s
采样次数 $N$	$2 \times 10^3$
目标中心斜距 $R$	5 m
成像单元尺寸 $l_c \times l_c$	0.01 m×0.01 m
信噪比(SNR)	20 dB

调相范围的增加, 空间域和时间域辐射场相关度分布的主瓣变细、旁瓣逐渐削弱、除主瓣之外的其他部分渐趋平整。证明参考信号矩阵的时空非相关性与调相范围成正比。

如图7、图8和图9分别为改变信号调频系数、采样时间间隔和采样次数时参考信号矩阵的空间相关性分布图。由图可明显看出随着调频系数、时间采样间隔和采样次数的增加, 空间非相关性有一定增强, 但没有改变调相范围时明显。同时发现图7、图8和图9的 (a)、(b)、(c) 图都对应一致。这是因为信号带宽  $B = kNt_s$ , 上面3组图中的子图 (a) 带宽为200 MHz, 子图 (b) 带宽为2 GHz, 子图 (c) 带宽为20 GHz。所以相同带宽下参考信号矩阵空间相关性一致。所以上述3个影响因素可以归结为调频带宽的增加有利于增强空间非相关性。

如图10所示分别为载频为140 GHz, 220 GHz 和340 GHz的空间相关度结果, 其他参数参考表1。很明显, 随着载频的增加, 参考信号矩阵的空间非相关性增强。

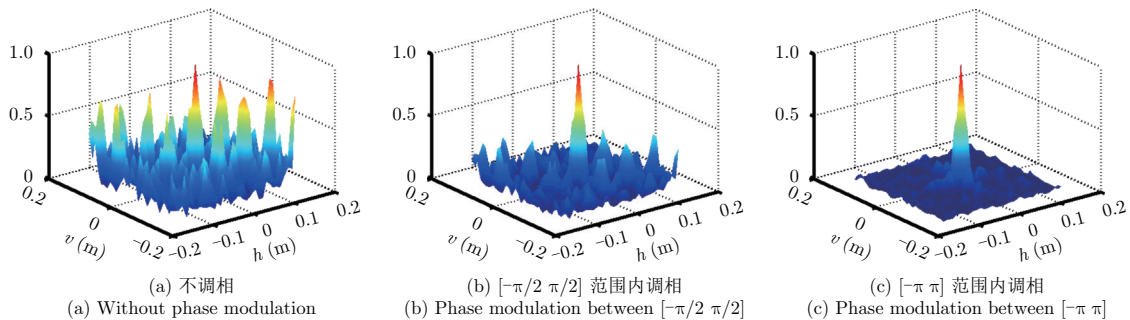


图 5 不同调相范围下的参考信号矩阵空间相关性

Fig. 5 Space correlations of the reference signal matrix under different phase modulation ranges

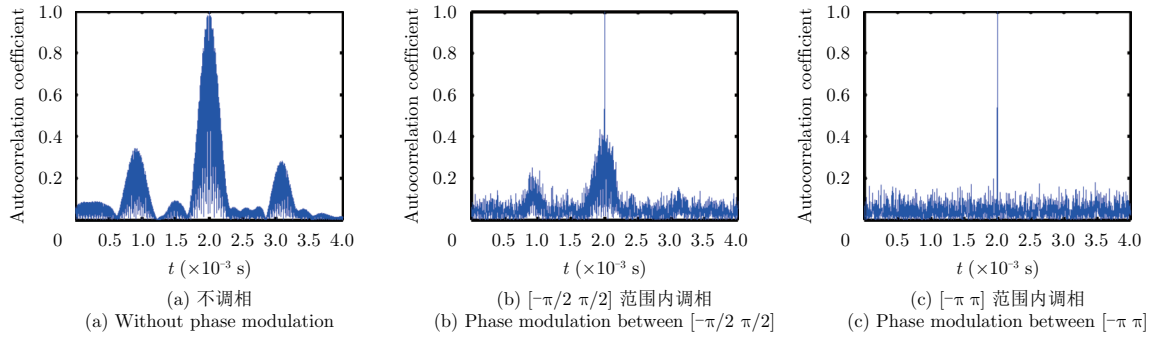


图6 不同调相范围内的参考信号矩阵时间相关性

Fig. 6 Time correlations of the reference signal matrix under different phase modulation ranges

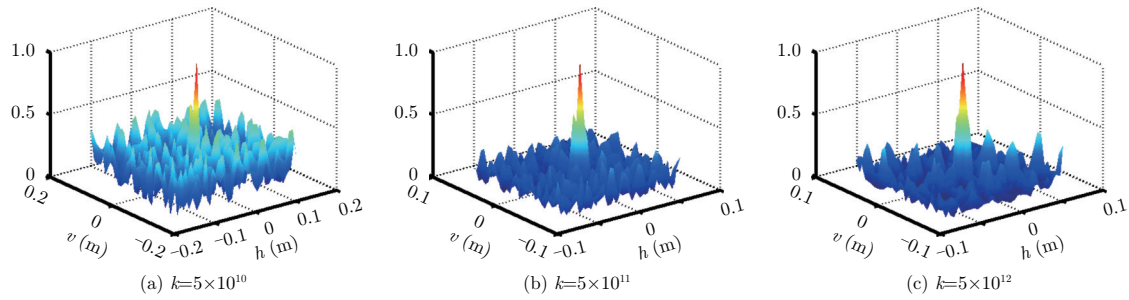


图7 不同调频系数下的参考信号矩阵空间相关性

Fig. 7 Space correlations of the reference signal matrix under different frequency modulation coefficients

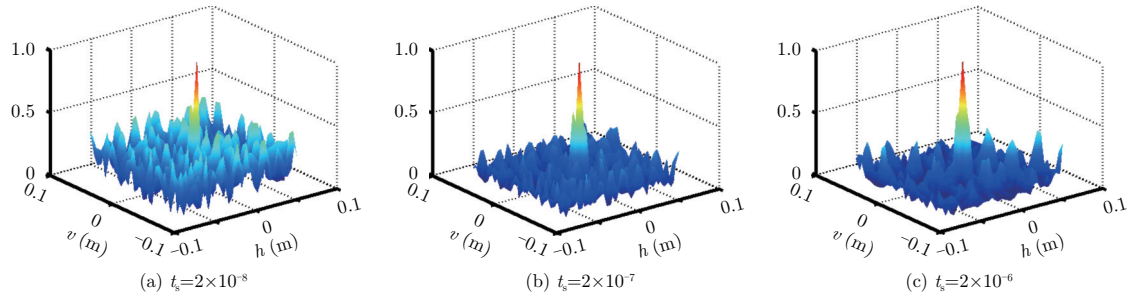


图8 不同时间采样间隔下的参考信号矩阵空间相关性

Fig. 8 Space correlations of the reference signal matrix under different time-sampling intervals

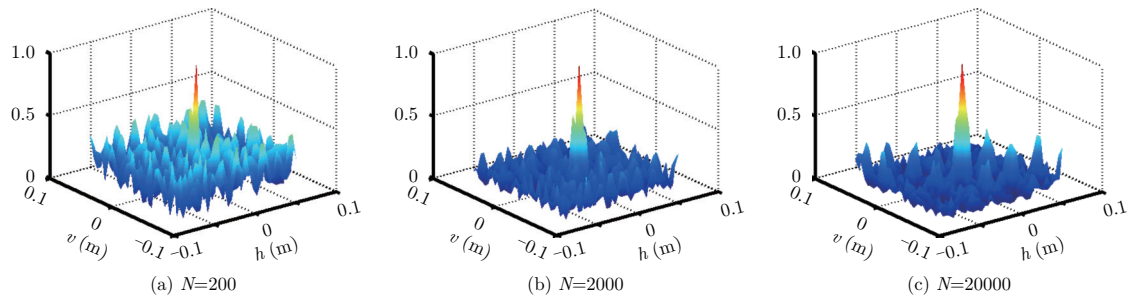


图9 不同采样次数下的参考信号矩阵空间相关性

Fig. 9 Space correlations of the reference signal matrix under different sampling times

### 4.2 编码天线对成像分辨性能的影响

假设采用的孔径编码天线是矩形面阵，每个编码孔径阵元以矩阵的形式排布。本节分析编码孔径阵元数量、编码孔径阵元尺寸、成像平面网格尺寸和编码孔径与成像平面的距离对成像质量的影响。

如图11和图12所示分别为改变编码孔径阵元数量和编码孔径阵元尺寸相关性结果，其他参数参考表1。可以看出，参考信号矩阵的空间非相关性随编码孔径阵元数量和编码孔径阵元尺寸的增加明显变强。



如图13所示分别为成像距离为0.5 m, 5 m, 15 m的空间相关度结果, 其他参数参考表1。随着成像距离的增加, 相关度分布的主瓣明显变粗, 副瓣明显变高, 空间分辨率降低, 信号的空间非相关性减弱。

### 4.3 成像算法对成像分辨性能的影响

针对图14(a)所示的手枪点目标, 分别采用匹配滤波法、最小二乘法、Tikhonov正则化方法和OMP稀疏重构法对其进行成像。对比4种成像方法的优缺点, 研究成像算法太赫兹孔径编码成像分辨

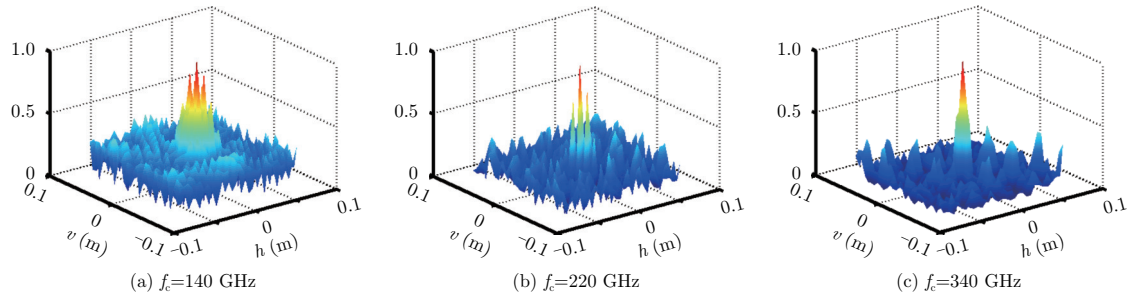


图 10 不同载频下的参考信号矩阵空间相关性

Fig. 10 Space correlations of the reference signal matrix under different carrier frequencies

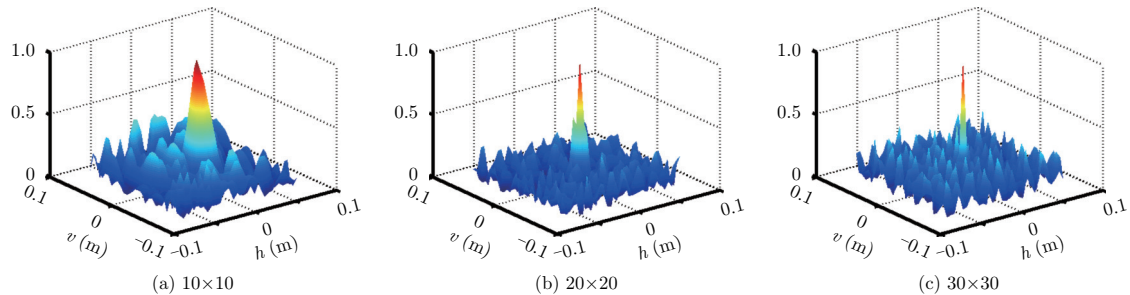


图 11 不同编码孔径阵元数量下的参考信号矩阵空间相关性

Fig. 11 Space correlations of the reference signal matrix under different reflector array-element numbers

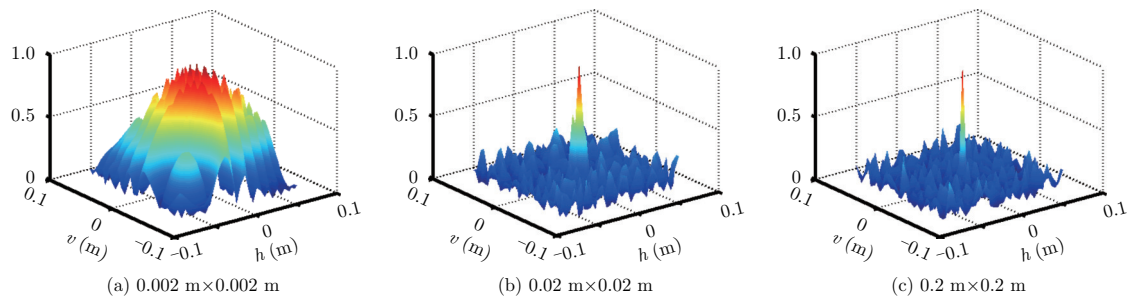


图 12 不同编码孔径阵元尺寸下的参考信号矩阵空间相关性

Fig. 12 Space correlations of the reference signal matrix under different sizes of coding-aperture element

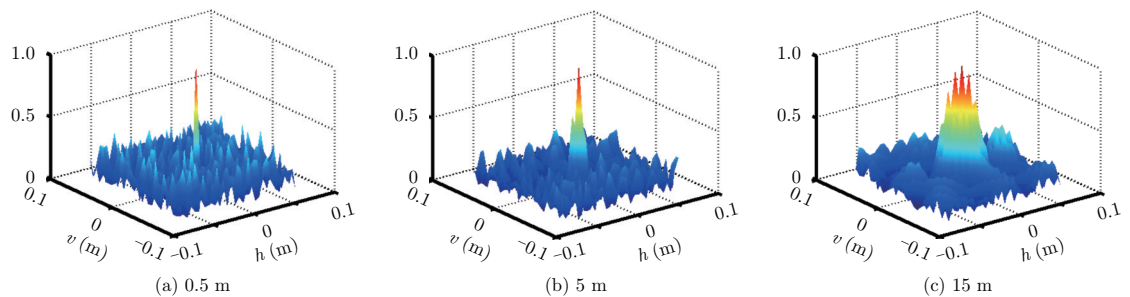


图 13 不同成像距离下的参考信号矩阵空间相关性

Fig. 13 Space correlations of the reference signal matrix under different imaging ranges

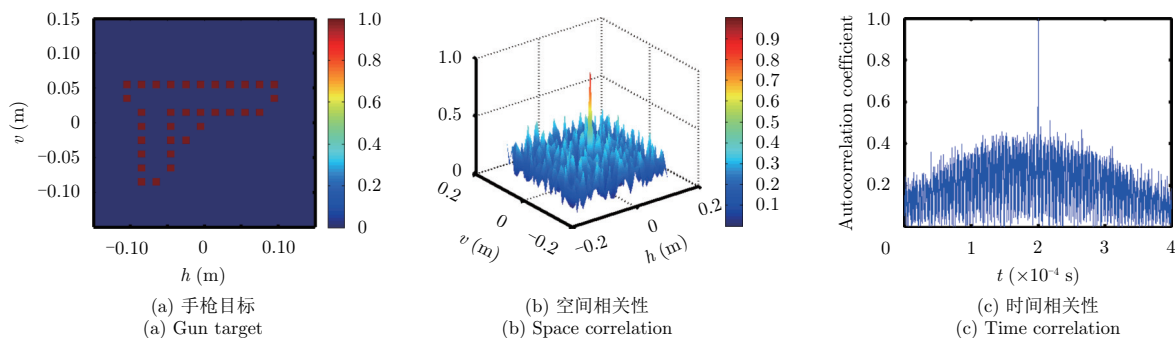


图 14 待成像手枪目标及参考信号矩阵的时空非相关性

Fig. 14 The imaging target of gun, space and time correlations of the reference signal matrix

性能的影响。成像仿真参数如表1所示，回波信号中包含噪声，信噪比为20 dB。首先分析参考信号矩阵的时空非相关性，如图14(b)、图14(c)所示。在上述参数下，参考信号具有明显时空非相关性，因而采用孔径编码方法可实现高分辨凝视成像。

然后分别采用上述方法对图14(a)目标进行成像。4种成像方法的成像结果如图15所示，成像运行的时间如表2所示。可以发现，虽然匹配滤波法成像所需时间最短，但是该方法无法重构出目标，成像分辨率极差。原因是匹配滤波法对参考信号矩阵的时空非相关性要求极高，但实际产生的信号很难实现辐射场的时空分布完全随机。最小二乘法

的成像速度优于OMP法，但其成像结果仅能显示出手枪模糊的轮廓，因为该方法没有利用目标和环境的先验信息，对噪声非常敏感。在最小二乘法的基础上，Tikhonov正则化方法利用了先验信息，成像结果较最小二乘法清晰，但该方法也牺牲了成像时间。OMP稀疏重构算法在4种方法中成像分辨率性能最优，运行时间折衷，因为该方法充分利用了目标的稀疏先验信息。针对本文提出的稀疏手枪目标，仿真结果证明了稀疏重构类算法应用于孔径编码成像的分辨优势。

最后，在太赫兹孔径编码成像分辨性能分析的基础上，基本参数参考表1，具体参数参考表3，对

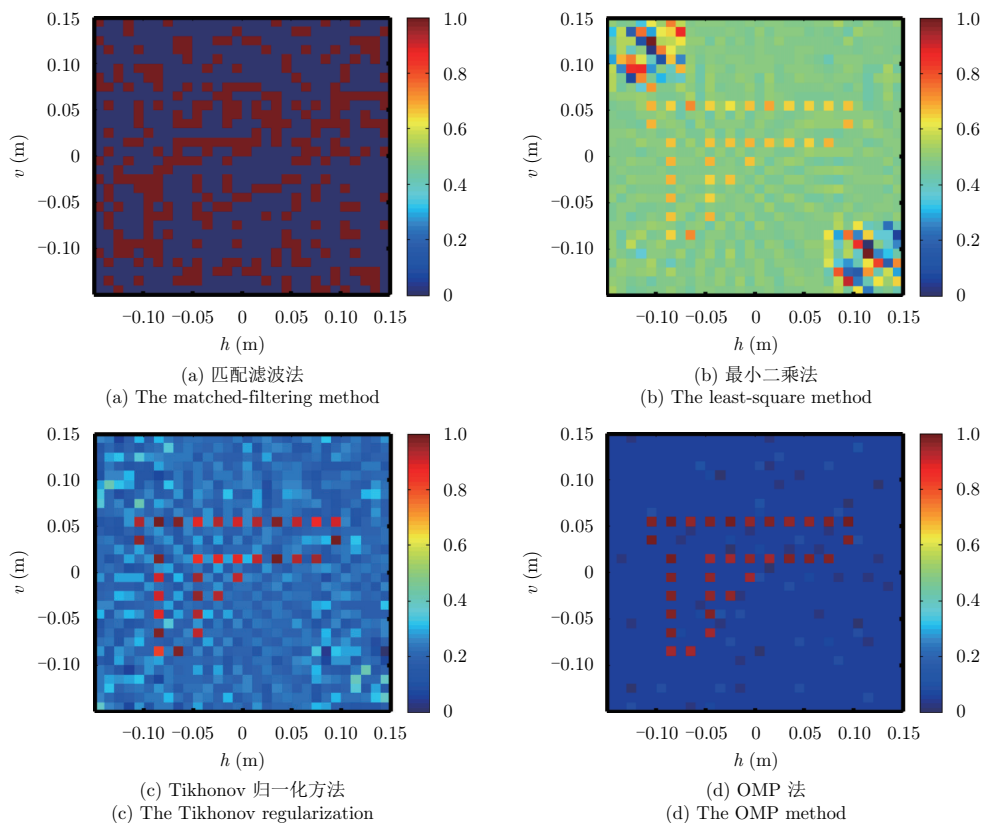


图 15 成像结果

Fig. 15 The imaging results

表 2 成像时间比较

Tab. 2 The imaging time comparisons

成像算法	运行时间(s)
匹配滤波法	0.350714
最小二乘法	0.679656
Tikhonov法	1.239225
OMP法	0.850584

表 3 关键成像参数

Tab. 3 The key imaging parameters

成像方式	编码孔径阵列尺寸(m×m)	编码孔径阵元数量	载频 (GHz)	信噪比 (dB)	成像距离(m)
阵列实孔径1	0.4×0.4	40×40	340	20	7
阵列实孔径2	0.4×0.4	<b>400×400</b>	340	20	7
孔径编码	0.4×0.4	40×40	340	20	7

比孔径编码成像和阵列实孔径分辨性能,二者信号处理和图像还原的过程都是求解方程 $\mathbf{S}\mathbf{r} = \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{w}$ ,

其本质区别在于孔径编码成像通过编码孔径空间调制的方式可获得时空2维随机的辐射场,实现波束内信息的分辨解析。3种成像方式的基本参数一致,阵列实孔径成像2方式增加了编码孔径阵元数量。如图16所示,比较阵列实孔径1成像和孔径编码成像,两种成像方式编码孔径阵列尺寸和阵元数目完全一致,载频340 GHz,对7 m处的手枪目标成像。阵列实孔径1成像结果分辨率明显较低,在加窗处理的情况下,旁瓣影响仍较为严重。阵列实孔径2成像结果较实孔径1成像效果明显改善,加窗后有一定旁瓣,成像效果略次于孔径编码方式。但阵列实孔径2阵元数量增加到400×400,阵元数量规模庞大,物理实现上有一定难度。而孔径编码在相同尺寸,采用相对较少编码孔径阵元的条件下,获得了自聚焦效果较好的点目标重构。通过上面的对比分析,可发现孔径编码成像在成本、便携性和成像分辨率上较阵列实孔径成像有明显优势。

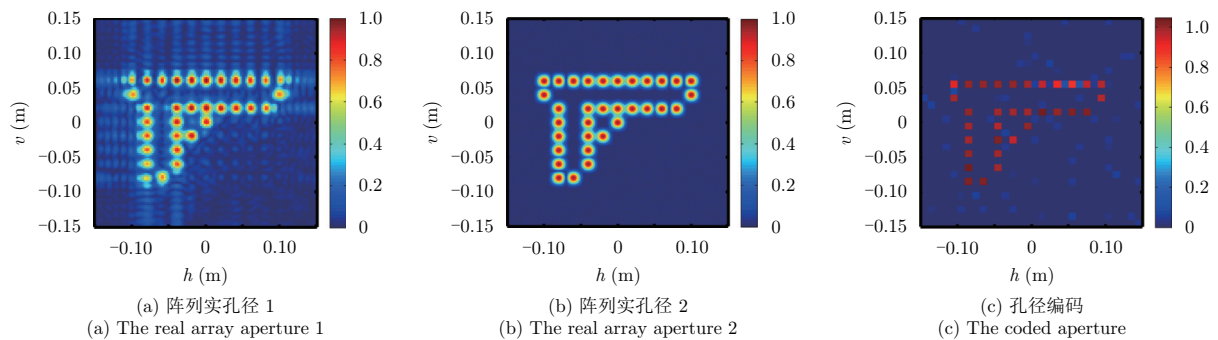


图 16 阵列实孔径成像和孔径编码成像对比

Fig. 16 The comparisons of real array aperture and coded-aperture imaging

## 5 结论

基于孔径编码天线,本文设计了太赫兹孔径编码成像的系统和准光扫描光路,理论推导了该方法成像质量的主要影响因素,以仿真方式,分析对比了孔径编码成像信号波形、孔径编码天线和不同算法对孔径编码成像分辨性能的影响,最后还仿真验证了孔径编码成像相对于阵列实孔径成像的优势。为太赫兹孔径编码成像在反恐安检和战场侦查等领域的应用奠定了基础。

## 参考文献

- [1] Liu H B, Zhong H, Karpowicz N, *et al.*. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(8): 1514–1527. DOI: [10.1109/JPROC.2007.898903](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.898903).
- [2] Cooper K B, Dengler R J, Llobart N, *et al.*. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 169–182. DOI: [10.1109/TTHZ.2011.2159556](https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2159556).
- [3] Cui T J, Qi M Q, Wan X, *et al.*. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [4] Levin A, Fergus R, Durand F, *et al.*. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 70. DOI: [10.1145/1276377](https://doi.org/10.1145/1276377).
- [5] Chan W L, Charan K, Takhar D, *et al.*. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121105. DOI: [10.1063/1.2989126](https://doi.org/10.1063/1.2989126).
- [6] Li D Z, Li X, Cheng Y Q, *et al.*. Radar coincidence imaging: An instantaneous imaging technique with stochastic signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(4): 2261–2277. DOI: [10.1109/TGRS.2013.2258929](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2258929).
- [7] Li D Z, Li X, Cheng Y Q, *et al.*. Radar coincidence imaging in the presence of target-motion-induced error[J]. *Journal of*

- Electronic Imaging*, 2014, 23(2): 023014. DOI: [10.1117/1.JEI.23.2.023014](https://doi.org/10.1117/1.JEI.23.2.023014).
- [8] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G, *et al.* A high-resolution imaging radar at 580 GHz[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, 18(1): 64–66. DOI: [10.1109/LMWC.2007.912049](https://doi.org/10.1109/LMWC.2007.912049).
- [9] Siegel P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910–928. DOI: [10.1109/22.989974](https://doi.org/10.1109/22.989974).
- [10] Sheen D M, Hall T E, Severtsen R H, *et al.* Active wideband 350 GHz imaging system for concealed-weapon detection[C]. Proceedings of SPIE Passive Millimeter-Wave Imaging Technology, Orlando, Florida, United States, 2009, 7309: 73090I.
- [11] Yu N F, Genevet P, Kats M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333–337. DOI: [10.1126/science.1210713](https://doi.org/10.1126/science.1210713).
- [12] Perez-Palomino G, Encinar J A, Dickie R, *et al.* Preliminary design of a liquid crystal-based reflectarray antenna for beam-scanning in THz[C]. Proceedings of 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Orlando, FL, USA, 2013: 2277–2278.
- [13] Perez-Palomino G, Barba M, Encinar J A, *et al.* Design and demonstration of an electronically scanned reflectarray antenna at 100 GHz using multiresonant cells based on liquid crystals[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(8): 3722–3727. DOI: [10.1109/TAP.2015.2434421](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2434421).
- [14] Llombart N, Cooper K B, Dengler R J, *et al.* Confocal ellipsoidal reflector system for a mechanically scanned active terahertz imager[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(6): 1834–1841. DOI: [10.1109/TAP.2010.2046860](https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2046860).
- [15] Martinez-Lorenzo J A, Garcia-Pino A, Gonzalez-Valdes B, *et al.* Zooming and scanning Gregorian confocal dual reflector antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(9): 2910–2919. DOI: [10.1109/TAP.2008.928777](https://doi.org/10.1109/TAP.2008.928777).
- [16] Imaizumi Y, Suzuki Y, Kawakami Y, *et al.* A study on an onboard Ka-band phased-array-fed imaging reflector antenna[C]. Proceedings of 2002 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Antonio, TX, USA, 2002, 4: 144–147.
- [17] Hansen P C. Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems: Numerical Aspects of Linear Inversion[M]. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1998: 45–67.

### 作者简介



陈 硕(1990–), 男, 出生于山东省菏泽市, 国防科技大学电子科学学院博士生, 从事太赫兹雷达孔径编码成像研究。  
E-mail: [chenshuo\\_nudt@163.com](mailto:chenshuo_nudt@163.com)



秦玉亮(1980–), 男, 出生于山东省潍坊市, 国防科技大学电子科学学院副研究员, 主要从事太赫兹雷达、雷达关联成像和电磁涡旋等研究。  
E-mail: [qinyuliang@nudt.edu.cn](mailto:qinyuliang@nudt.edu.cn)



罗成高(1987–), 男, 出生于湖北恩施, 国防科学技术大学讲师, 从事光学3维成像与显示、太赫兹雷达成像以及孔径编码雷达成像研究。  
E-mail: [luochenggao@nudt.edu.cn](mailto:luochenggao@nudt.edu.cn)



王宏强(1970–), 男, 出生于陕西省宝鸡市, 国防科技大学电子科学学院研究员, 973技术首席, 原863太赫兹专家, 中国兵工学会太赫兹应用技术专业委员会委员, 从事太赫兹雷达、雷达信号处理和自动目标识别等研究。  
E-mail: [oliverwhq@tom.com](mailto:oliverwhq@tom.com)



邓 彬(1981–), 男, 出生于山东省邹城市, 国防科技大学电子科学学院副研究员, 从事合成孔径雷达、太赫兹雷达微动与成像等研究。  
E-mail: [dengbin\\_nudt@163.com](mailto:dengbin_nudt@163.com)



庄钊文(1958–), 男, 出生于福建省南安市, 国防科技大学电子科学学院教授, 主要从事雷达信号处理、动目标识别和卫星导航与定位等研究。  
E-mail: [zhaowenzhuang@nudt.edu.cn](mailto:zhaowenzhuang@nudt.edu.cn)