



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103235298 B

(45) 授权公告日 2015. 08. 05

(21) 申请号 201310167360. 6

(22) 申请日 2013. 05. 08

(73) 专利权人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白南路 2 号

(72) 发明人 李军 伊孟磊 廖桂生 董晓飞

刘长赞 邵自力

(74) 专利代理机构 陕西电子工业专利中心

61205

代理人 王品华 朱红星

(51) Int. Cl.

G01S 7/41(2006. 01)

G01S 13/89(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101620273 A, 2010. 01. 06, 全文.

CN 102141618 A, 2011. 08. 03, 说明书第.

白旭等. 基于压缩感知的差分关联成像方案研究. 《物理学报》. 2013, 第 62 卷 (第 4 期), 第 044209-1 页 - 第 044209-8 页.

Ling Cen 等. Linear Sparse Array Synthesis via Convex Optimization. 《2010 IEEE》. 2010, 4233-4236.

乞耀龙等. 基于压缩感知的稀疏阵列近景微波三维成像. 《电子测量技术》. 2012, 第 35 卷 (第 5 期), 66-71.

审查员 肖丁

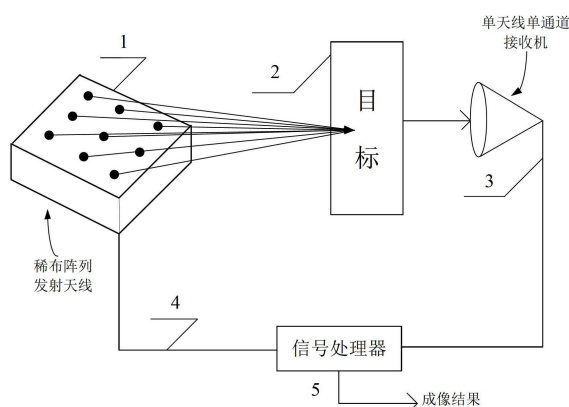
权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

基于稀疏阵列的微波关联成像系统与成像方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于稀疏阵列的微波关联成像系统与成像方法, 主要解决现有技术在雷达天线与目标没有非径向相对运动时成像效果差, 分辨率低的问题。该系统包括: 发射天线 (1)、目标 (2)、接收机 (3) 和信号处理器 (5), 发射天线 (1) 由稀疏阵列天线构成, 各阵元发射不同的微波编码信号在空间非相干叠加形成微波辐射场, 通过该微波辐射场对目标 (2) 进行照射产生目标散射回波, 存储目标 (2) 表面的微波辐射场 (4), 接收机 (3) 采用单天线、单通道接收目标散射回波; 接收机 (3) 接收到的目标散射回波和预存的微波辐射场 (4) 通过信号处理器 (5) 处理, 得到目标的成像。本发明能够在雷达天线与目标没有非径向相对运动时, 实现对目标的无模糊、超分辨率成像, 可用于机载前视雷达、球载雷达对目标的超分辨率成像。



1. 一种基于稀疏阵列的微波关联成像方法,包括如下步骤:

1) 获取目标的辐射场矩阵  $\Phi$  和散射回波向量  $y$ ;

2) 根据目标在空间的分布特征选择稀疏基矩阵  $\Psi$ ;

3) 将辐射场矩阵  $\Phi$  与所选稀疏基矩阵  $\Psi$  相乘,得到测量矩阵  $\Theta = \Phi \Psi$ ;

4) 通过散射回波向量公式  $y = \Theta \alpha + \varepsilon$ , 其中  $\varepsilon$  为高斯白噪声向量,求解下式得到稀疏系数向量  $\alpha$ :

$$\min_{\alpha \in \mathbb{C}^N} \|\alpha\|_{\omega,1} + (1/2\gamma) \|\Theta\alpha - y\|_2^2$$

其中  $\|\cdot\|_{\omega,1}$  为加权 L1 范数,表示为:  $\|\alpha\|_{\omega,1} = \sum_{n=1}^N \omega_n |\zeta_n|$ ,  $|\cdot|$  表示取复数的模值,稀疏系数向量  $\alpha = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n, \dots, \zeta_N]^H \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ,  $H$  表示向量的共轭转置,  $\mathbb{C}$  表示复数空间;

$[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \dots, \omega_N]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  为给定的非负权值向量,  $T$  表示向量的转置,  $\mathbb{R}$  表示实数空间;  $\|\cdot\|_2$  为 L2 范数,  $\gamma$  为与噪声水平有关的常数;

5) 将步骤 4 求得的稀疏系数向量  $\alpha$  代入公式  $x = \Psi \alpha$ , 解得目标的后向散射系数向量  $x$ ;

6) 将目标的后向散射系数向量  $x$  重排为与目标大小  $P \times Q$  对应的矩阵,利用重排后得到的矩阵成像,即得到目标的成像。

2. 如权利要求 1 所述的基于稀疏阵列的微波关联成像方法,其特征在于,步骤 2) 所述的根据目标在空间的分布特性选择稀疏基矩阵  $\Psi$ ,按如下方式进行:

当目标在空间为稀疏分布时,则选择单元矩阵作为稀疏基矩阵  $\Psi$ ;

当目标在空间为非稀疏分布时,则选择离散余弦变换 DCT 或离散小波变换 DWT 矩阵作为稀疏基矩阵  $\Psi$ 。

3. 如权利要求 1 所述的基于稀疏阵列的微波关联成像方法,其特征在于,步骤 3) 所述的由辐射场矩阵  $\Phi$  与所选稀疏基矩阵  $\Psi$  相乘得到测量矩阵  $\Theta = \Phi \Psi$ ,该测量矩阵  $\Theta$  满足压缩感知理论中的受限等距特性 RIP,即对于一个正整数  $S$ ,存在一个常数  $\delta_s$ ,使得测量矩阵  $\Theta$  能保证如下不等式成立:  $(1-\delta_s) \|\beta\|_2^2 \leq \|\Theta\beta\|_2^2 \leq (1+\delta_s) \|\beta\|_2^2$ , 其中  $\delta_s$  满足  $0 < \delta_s < 1$ ,  $\beta$  为稀疏度不超过  $S$  的任意向量,即向量  $\beta$  中最多含有  $S$  个非零值,  $\|\cdot\|_2$  表示向量的 L2 范数。

## 基于稀疏阵列的微波关联成像系统与成像方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于雷达技术领域,涉及微波关联成像系统与成像方法,可用于稀疏阵列天线构造、信号的采集处理和最优化算法应用。

### 技术背景

[0002] 利用纠缠光子对实现量子关联成像的方案是苏联学者 David Nikolaevich Klyshko 于 1988 年首次在理论上提出的。美国马里兰大学的史砚华、T.B.Pittman 等人于 1995 年利用自发参量下转换 SPDC 过程产生的纠缠光子对,结合符合测量技术,实现了一种量子关联成像和干涉现象。2004 年,意大利的 Lugiato 小组从理论上提出了利用普通经典热光源也可以实现关联成像。2005 年,史砚华小组使用激光入射毛玻璃产生的赝热光完成了第一个热光源的关联成像实验。2006 年,史砚华小组首次实现了无透镜的关联成像。2011 年史砚华小组实现了利用日光照射源的关联成像试验。与纠缠源关联成像相比,热光源关联成像发射源产生简单,信号稳定度高,更容易在实际工程中应用。

[0003] 基于稀疏约束和冗余表象的数据采集和信号重构理论是近 30 年发展起来的不同与经典香农信息论的全新信息理论,已在压缩感知 CS 等领域显示出巨大的应用潜力。D. Donoho, E. Candes 和 Terence Tao 等多位著名学者的大量工作已经从数学上严格证明了在远低于奈奎斯特采样极限的情况下,使用压缩感知采样可以高概率重构目标信息。压缩感知采样要求目标具有稀疏特性或者目标在某些表象下具有稀疏特性,并且其探测矩阵需要满足受限等距特性 RIP。在真实成像中,稀疏特性是比较容易满足的,而高斯随机矩阵、伯努利随机矩阵以及托普利兹随机矩阵等均已被证明满足受限等距特性 RIP 条件。目前,压缩感知理论正在向包括医学成像、信道编码、人脸识别、通信、超光谱成像、雷达和生命科学等领域发展并获得了许多研究成果。

[0004] 如上所述,量子关联成像从最初使用纠缠光源,后来用赝热光源、日光源实现,说明不具备量子特性的经典信号源实现关联成像是可行的。但由于光信号穿透力弱,容易受到大气等自然环境影响,很难实现全天时全天候成像,而在雷达系统中,使用微波信号作为发射信号,可以实现全天时全天候成像;在收集和处理方面,微波信号有成熟的采集和处理芯片,比纠缠光源和赝热光源系统更容易构建;采用微波信号实现关联成像的关键是实现能模拟光场的空时随机涨落的微波场,现有方法是在构建大型传统面天线的基础上,辐射高斯随机信号来实现空时随机涨落的微波辐射场,系统复杂度很高。

[0005] 压缩感知理论作为近些年提出的全新的信息理论,在许多领域都显示出巨大的应用潜力,但其在微波关联成像领域的应用研究还比较少。

[0006] 现有技术在雷达天线与目标没有非径向相对运动时,成像效果差,分辨率低。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的在于针对上述已有技术的不足,提出一种基于稀疏阵列的微波关联成像系统及成像方法,将关联成像理论从光学拓展到微波领域并利用压缩感知理论解决相

应的问题,提高成像效果和分辨率。

[0008] 为实现上述目的,本发明基于稀疏阵列的微波关联成像系统,包括:发射天线 1、目标 2、接收机 3 和信号处理器 5,利用发射天线 1 产生的微波辐射场对目标 2 进行照射产生目标的散射回波,存储目标 2 表面相应的微波辐射场 4,接收机 3 接收目标的散射回波,接收机 3 接收到的目标散射回波和预存的微波辐射场 4 通过信号处理器 5 处理,得到目标的成像,其特征在于:

[0009] 所述发射天线 1,采用由多个阵元稀疏排布构成的稀布阵列天线,各阵元发射不同的微波编码信号在空间非相干叠加形成微波辐射场,该微波辐射场具有赝热光辐射场的空时随机波动特性;

[0010] 所述接收机 3,采用单天线、单通道模式。

[0011] 作为优选,本发明基于稀疏阵列的微波关联成像系统,其特征在于,发射天线 1 相邻两阵元间距  $d$  满足  $d > \frac{\lambda}{2}$ ,其中  $\lambda$  是信号的波长;

[0012] 作为优选,本发明基于稀疏阵列的微波关联成像系统,其特征在于,发射天线 1 产生的微波辐射场对目标 2 的照射次数  $M$  远小于目标 2 的分辨单元总数  $N$ ,其中  $N = P \times Q$ ,  $P$  为目标 2 的横向分辨单元数,  $Q$  为目标 2 的纵向分辨单元数。

[0013] 为实现上述目的,本发明基于稀疏阵列的微波关联成像方法,包括如下步骤:

[0014] 1) 获取目标的辐射场矩阵  $\Phi$  和散射回波向量  $y$ ;

[0015] 2) 根据目标在空间的分布特征选择稀疏基矩阵  $\Psi$ ;

[0016] 3) 将辐射场矩阵  $\Phi$  与所选稀疏基矩阵  $\Psi$  相乘,得到测量矩阵  $\Theta = \Phi \Psi$ ;

[0017] 4) 通过散射回波向量公式  $y = \Theta \alpha + \varepsilon$ ,其中  $\varepsilon$  为高斯白噪声向量,求解下式得到稀疏系数向量  $\alpha$ :

$$[0018] \quad \min_{\alpha \in \mathbb{C}^N} \|\alpha\|_{\omega,1} + (1/2\gamma) \|\Theta\alpha - y\|_2^2$$

[0019] 其中  $\|\cdot\|_{\omega,1}$  为加权 L1 范数,表示为:  $\|\alpha\|_{\omega,1} = \sum_{n=1}^N \omega_n |\zeta_n|$ ,  $|\cdot|$  表示取复数的模

值,稀疏系数向量  $\alpha = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n, \dots, \zeta_N]^H \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ,  $H$  表示向量的共轭转置,  $\mathbb{C}$  表示复数空间;  $[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \dots, \omega_N]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  为给定的非负权值向量,  $T$  表示向量的转置,  $\mathbb{R}$  表示实数空间;  $\|\cdot\|_2$  为 L2 范数,  $\gamma$  为与噪声水平有关的常数;

[0020] 5) 将步骤 4 求得的稀疏系数向量  $\alpha$  代入公式  $x = \Psi \alpha$ ,解得目标的后向散射系数向量  $x$ ;

[0021] 6) 将目标的后向散射系数向量  $x$  重排为与目标大小  $P \times Q$  对应的矩阵,利用重排后得到的矩阵成像,即得到目标的成像。

[0022] 本发明与现有技术相比,具有如下优点:

[0023] a) 本发明的成像系统不需要雷达天线与目标具有非径向相对运动就可以得到目标的高分辨成像,与现有的合成孔径雷达 SAR 技术需要雷达天线与目标具有非径向相对运动,经过长时间的积累合成较大的孔径来获得目标的高分辨成像相比,设备使用量少,系统复杂度低;

[0024] b) 本发明的成像系统联合目标散射回波和辐射场数据对目标进行成像,与现有的

凝视雷达成像技术只利用目标散射回波数据对目标进行成像相比,得到的目标成像效果较好、分辨率较高;

[0025] c) 本发明的成像系统使用穿透力强、不容易受到大气等自然环境影响的微波信号作为发射信号,与现有的热光关联成像技术使用光信号作为发射信号相比,可以实现全天时全天候成像。

## 附图说明

[0026] 图 1 是本发明基于稀疏阵列的微波关联成像系统示意图;

[0027] 图 2 是热光辐射场的三维和二维示意图;

[0028] 图 3 是本发明在发射天线相邻两阵元间距  $d = \frac{\lambda}{2}$  情况下,微波辐射场的三维和二维示意图;

[0029] 图 4 是本发明在发射天线相邻两阵元间距  $d = 40\lambda$  情况下,微波辐射场的三维和二维示意图;

[0030] 图 5 是本发明基于稀疏阵列的微波关联成像方法流程图;

[0031] 图 6 是目标的真实分布图;

[0032] 图 7 是用本发明的成像方法对图 6 的仿真结果。

## 具体实施方式

[0033] 以下结合各附图对本发明作进一步详述,下面通过参考附图描述的实施例是示例性的,仅用于解释本发明,而不能解释为对本发明的限制。

[0034] 参考图 1,本发明的基于稀疏阵列的微波关联成像系统,包括发射天线 1、目标 2、接收机 3 和信号处理器 5,其中,发射天线 1 由稀疏阵列天线组成,各阵元发射不同的微波编码信号在空间非相干叠加形成微波辐射场,该微波辐射场对目标 2 进行照射产生目标散射回波,存储目标 2 表面相应的微波辐射场 4,接收机 3 接收目标散射回波,接收机 3 接收到的目标散射回波和预存的微波辐射场 4 通过信号处理器 5 处理,得到目标的成像。

[0035] 所述的接收机 3 采用单天线、单通道接收模式,用于接收微波辐射场对目标照射后产生的目标散射回波。

[0036] 所述的信号处理器 5 采用高速、大内存的计算机,用于处理目标散射回波和辐射场数据,实现目标的成像。

[0037] 所述的发射天线 1 采用二维稀疏阵列天线,该二维稀疏阵列天线采用矩形阵列模式,但不限于这种结构,它设有 25 个阵元,均匀分布在矩形面内;稀疏阵列天线相邻两阵元间距  $d$  满足  $d > \frac{\lambda}{2}$ ,本实例取但不限于  $d = 40\lambda$ ,其中  $\lambda$  为信号波长。各阵元发射但不限于

频率随机变化的微波编码信号的叠加  $x_i(t) = \sum_{l=1}^L e^{j2\pi f_{il}t}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 25$  表示不同的阵元,其中  $L$  为给定的常数,  $f_{i1}$  为微波编码信号的频率,该频率随着  $i$  的变化在 0-1GHz 范围内随机变化。

[0038] 各阵元发射的微波编码信号  $x_i(t) = \sum_{l=1}^L e^{j2\pi f_{il}t}$  在空间非相干叠加产生的微波辐射场

表示为： $S(t) = \sum_{i=1}^{25} x_i(t) = \sum_{i=1}^{25} \sum_{l=1}^L e^{j2\pi f_{il}t}$ ，该微波辐射场  $S(t)$  具有赝热光辐射场的空时随机波动特性。

[0039] 本实例产生的微波辐射场  $S(t)$  具有的特征由以下附图解释说明：

[0040] 图 2(a) 和图 2(b) 是赝热光辐射场的三维和二维示意图，从图 2 中可以看出，该辐射场具有很好的空时随机波动特性；

[0041] 图 3(a) 和图 3(b) 是用本发明在发射天线相邻两阵元间距  $d = \frac{\lambda}{2}$  情况下，微波辐射场  $S(t)$  的三维和二维示意图，与图 2 对比可以看到，图 3 所示的微波辐射场的空时随机波动特性较差；

[0042] 图 4(a) 和图 4(b) 是用本发明在发射天线相邻两阵元间距  $d = 40\lambda$  情况下，微波辐射场  $S(t)$  的三维和二维示意图，与图 3 对比可以看到，由于发射天线阵列稀疏排布，即相邻两阵元间距  $d > \frac{\lambda}{2}$ ，使得在用相同阵元数组成发射天线阵列时，产生的微波辐射场的空时随机特性增强；与图 2 对比可以看到，图 4 所示的微波辐射场具有与赝热光辐射场相似的空时随机波动特性。

[0043] 参照图 5，本发明基于稀疏阵列的微波关联成像方法，包括如下步骤：

[0044] 步骤 1，获取目标的辐射场矩阵  $\Phi$  和散射回波向量  $y$ ：

[0045] 1.1) 用产生的微波辐射场  $S(t)$  对目标  $P \times Q$  进行照射，其中  $P$  和  $Q$  分别表示目标的横纵向分辨单元数，在每次照射中，对微波辐射场  $S(t)$  做统计分析，将其重新排为一行向量  $\phi_m$  并存储， $\phi_m \in C^{1 \times N}$ ，其中  $N = P \times Q$  为目标的分辨单元总数， $C$  表示复数空间；接收机接收目标散射回波信号，将接收到的目标散射回波信号求和后存储，记为  $r_m$ ， $r_m \in C^{1 \times 1}$  为一标量；

[0046] 1.2) 微波辐射场  $S(t)$  对成像目标照射  $M$  次后，由向量  $\phi_m$  和标量  $r_m$  分别构成辐射场矩阵  $\Phi = [\phi_1^H, \phi_2^H, \dots, \phi_m^H, \dots, \phi_M^H]^H$  和散射回波向量  $y = [r_1, r_2, \dots, r_m, \dots, r_M]^H$ ，其中  $H$  表示共轭转置， $m = 1, 2, \dots, M$ ， $M$  远小于  $N$ 。

[0047] 步骤 2，根据成像目标在空间的分布特征选择稀疏基矩阵  $\Psi$ ：

[0048] 当目标在空间为稀疏分布时，则选择单位矩阵作为稀疏基矩阵  $\Psi$ ；

[0049] 当目标在空间为非稀疏分布时，则选择离散余弦变换 DCT 或离散小波变换 DWT 矩阵作为稀疏基矩阵  $\Psi$ 。

[0050] 步骤 3，将辐射场矩阵  $\Phi$  与所选稀疏基矩阵  $\Psi$  相乘，得到测量矩阵  $\Theta = \Phi \Psi$ 。

[0051] 步骤 4，通过散射回波向量公式  $y = \Theta \alpha + \varepsilon$ ，其中  $\varepsilon$  为高斯白噪声向量，求解下式得到稀疏系数向量  $\alpha$ ：

$$[0052] \quad \min_{\alpha \in C^N} \|\alpha\|_{\omega,1} + (1/2\gamma) \|\Theta\alpha - y\|_2^2$$



[0053] 其中  $\|\cdot\|_{\omega,1}$  为加权 L1 范数,表示为:  $\|\alpha\|_{\omega,1} = \sum_{n=1}^N \omega_n |\zeta_n|$ ,  $|\cdot|$  表示取复数的模值,稀疏系数向量  $\alpha = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n, \dots, \zeta_N]^H \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ,  $H$  表示向量的共轭转置,  $\mathbb{C}$  表示复数空间;  $[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \dots, \omega_N]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  为给定的非负权值向量,这里取但不限于单位向量,即取各元素均为 1:  $[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \dots, \omega_N]^T = [1, 1, \dots, 1, \dots, 1]^T$ ,  $T$  表示向量的转置,  $\mathbb{R}$  表示实数空间;

[0054] 其中  $\|\cdot\|_2$  为 L2 范数,  $\gamma$  为与噪声水平有关的常数,取  $\gamma = \text{var}(\varepsilon)$ ,  $\text{var}(\cdot)$  为取噪声向量的方差;

[0055] 这里定义信噪比  $\text{SNR} = 10 \log(e_y/e_\varepsilon)$ , 其中  $e_y$  为散射回波向量  $y$  的平均能量值,  $e_\varepsilon$  为高斯白噪声向量的平均能量值,分别为:  $e_y = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |r_m|^2$ ,  $e_\varepsilon = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |\sigma_m|^2$ , 其中  $y = [r_1, r_2, \dots, r_m, \dots, r_M]^H$ ,  $\varepsilon = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m, \dots, \sigma_M]^H$ 。

[0056] 步骤 5, 将步骤 4 求得的稀疏系数向量  $\alpha$  代入公式  $x = \Psi \alpha$ , 解得目标的后向散射系数向量  $x$ 。

[0057] 步骤 6, 将目标的后向散射系数向量  $x$  重排为与目标大小  $P \times Q$  对应的矩阵, 利用重排后得到的矩阵成像, 即得到目标的成像。

[0058] 本发明基于稀疏阵列的微波关联成像方法能实现目标成像的理论分析如下:

[0059] 步骤 1 所述的辐射场矩阵  $\Phi$  由微波辐射场  $S(t)$  获得, 该微波辐射场  $S(t)$  具有赝热光辐射场的空时随机波动特性, 使获得的辐射场矩阵  $\Phi$  具有高斯分布的随机特性;

[0060] 参考压缩感知理论可知, 由于步骤 2 选择的稀疏基矩阵  $\Psi$  不影响矩阵  $\Phi$  的分布特性, 当辐射场矩阵  $\Phi$  具有高斯分布的随机特性时, 由步骤 3 得到的测量矩阵  $\Theta = \Phi \Psi$ , 满足压缩感知理论中的受限等距特性 RIP, 即对于一个正整数  $S$ , 存在一个常数  $\delta_s$ , 使得测量矩阵  $\Theta$  能保证如下不等式成立:  $(1 - \delta_s) \|\beta\|_2^2 \leq \|\Theta \beta\|_2^2 \leq (1 + \delta_s) \|\beta\|_2^2$ , 其中  $\delta_s$  满足  $0 < \delta_s < 1$ ,  $\beta$  为稀疏度不超过  $S$  的任意向量, 即向量  $\beta$  中最多含有  $S$  个非零值,  $\|\cdot\|_2$  表示向量的 L2 范数;

[0061] 测量矩阵  $\Theta$  满足压缩感知理论中的受限等距特性 RIP, 能保证本实例的成像方法实现正确、可靠的目标成像。

[0062] 本实例成像方法的成像效果可以通过以下仿真结果进一步说明:

[0063] 1. 仿真条件

[0064] 考虑由 25 个阵元组成的均匀矩形阵列发射天线, 各阵元发射上述的微波编码信号  $x_i(t) = \sum_{l=1}^L e^{j2\pi f_{il}t}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 25$ , 其他参数为: 载波频率  $f_c = 3\text{GHz}$ , 载波波长  $\lambda = c/f_c$ ,

其中  $c$  为光速, 相邻两阵元间距  $d = 40\lambda$ , 信号带宽  $B = 1\text{GHz}$ , 发射天线与目标间的距离  $R_c = 1000\text{m}$ , 接收机采用单天线、单通道模式, 选择单位矩阵作为稀疏基矩阵  $\Psi$ , 信噪比  $\text{SNR} =$

10dB, 该配置下的瑞利衍射极限  $r_{\text{ray}} = \frac{\lambda}{4\sqrt{2}d} R_c = 4.42\text{m}$ 。

[0065] 2. 仿真内容

[0066] 在所述仿真条件下, 进行如下实验:

[0067] 图 6 为目标  $20\text{m} \times 20\text{m}$  的真实分布图, 图中 4 个条形目标的间隔分别为 1m, 2m 和 4m, 近似为超过瑞利衍射极限的 4 倍, 2 倍和 1 倍。

[0068] 用本实例的微波辐射场对图 6 目标照射 200 次, 用本实例的成像方法对图 6 进行仿真成像, 仿真结果如图 7 所示。

[0069] 从图 7 的仿真结果可以看出, 利用本实例的微波辐射场和相应的成像算法可以在较低信噪比下实现超过瑞利衍射极限的超分辨成像, 虽然成像结果中存在一些杂噪点, 但目标的整体特征和细节信息都清晰可见。

[0070] 综上, 本仿真验证了本发明的正确性、可实现性和可靠性。



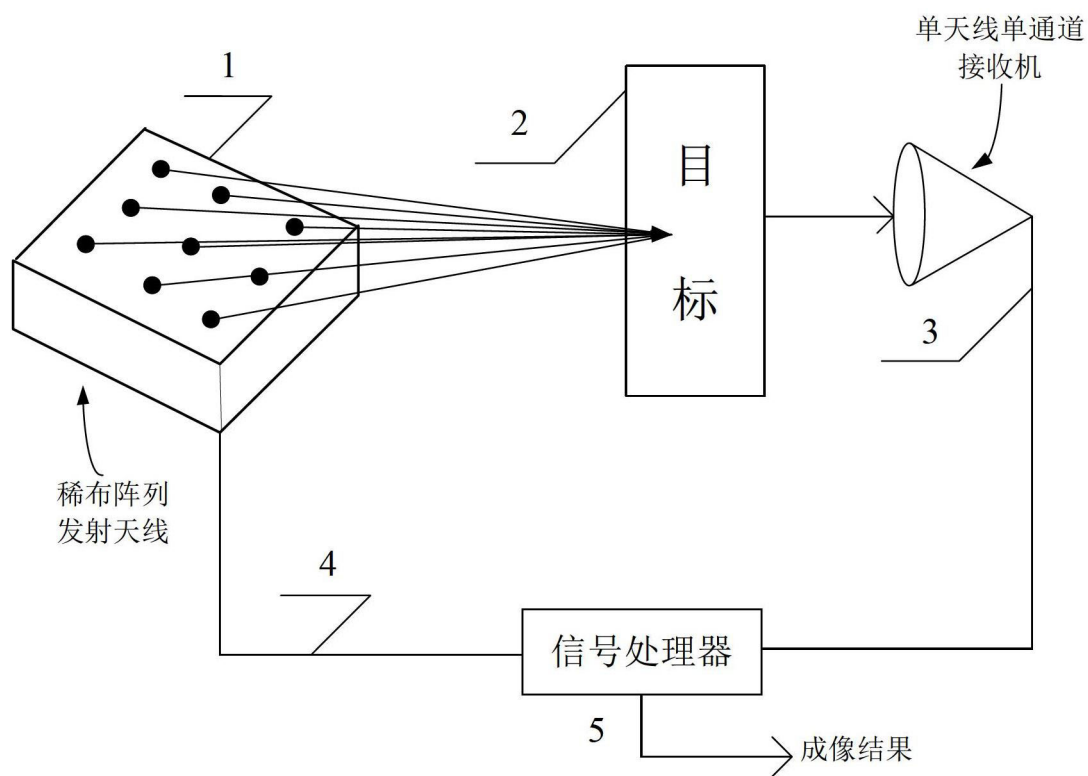


图 1

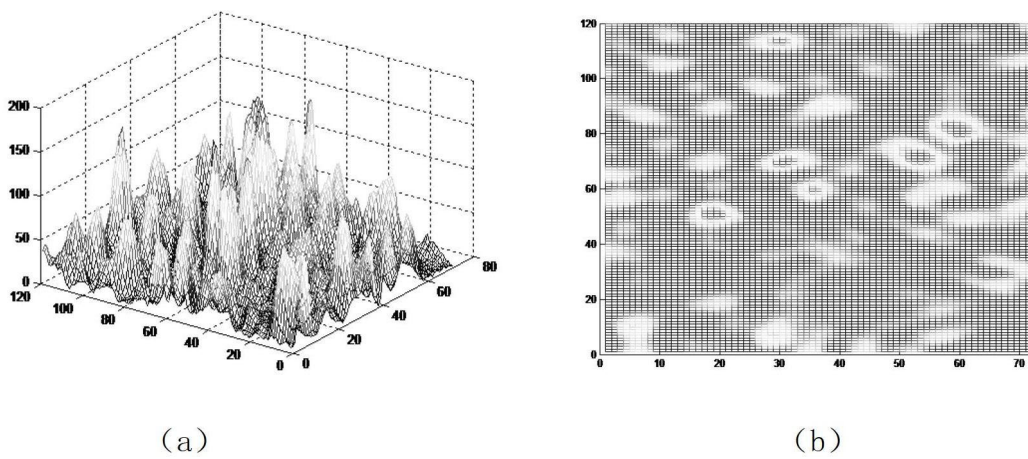


图 2

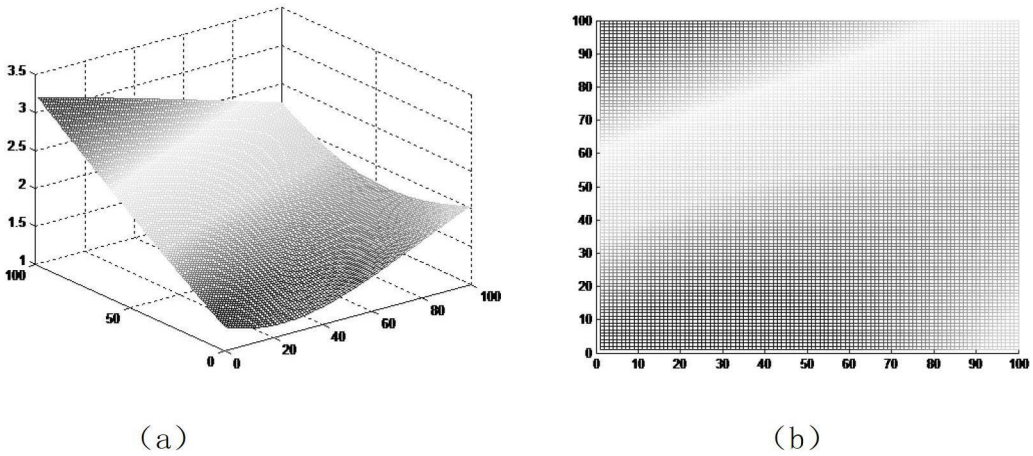


图 3

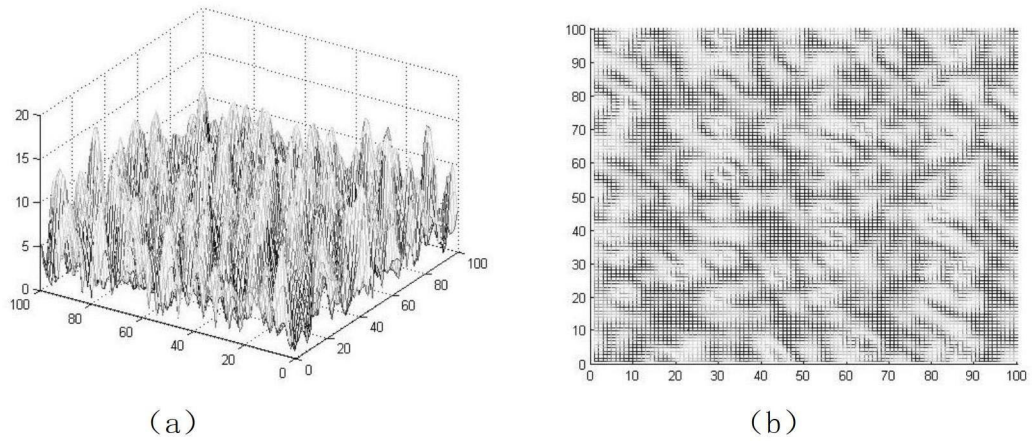


图 4

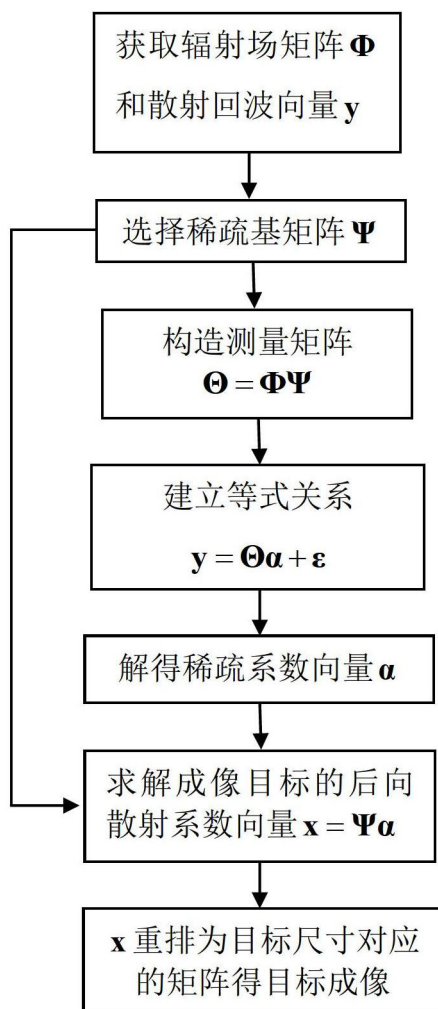


图 5

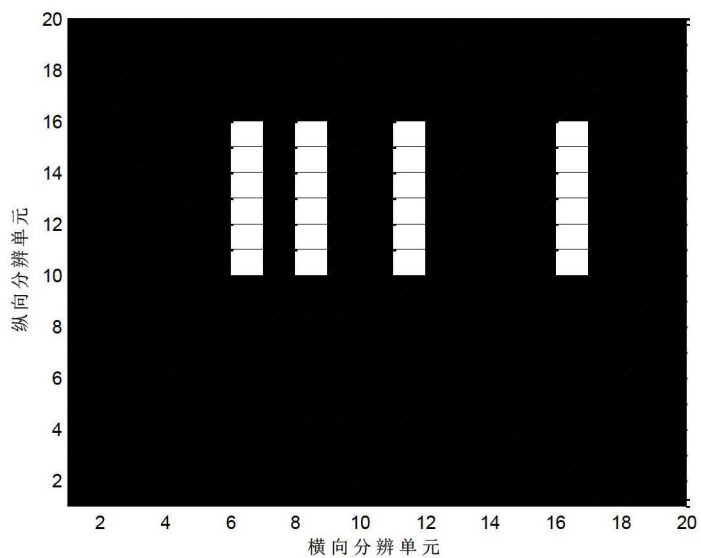


图 6

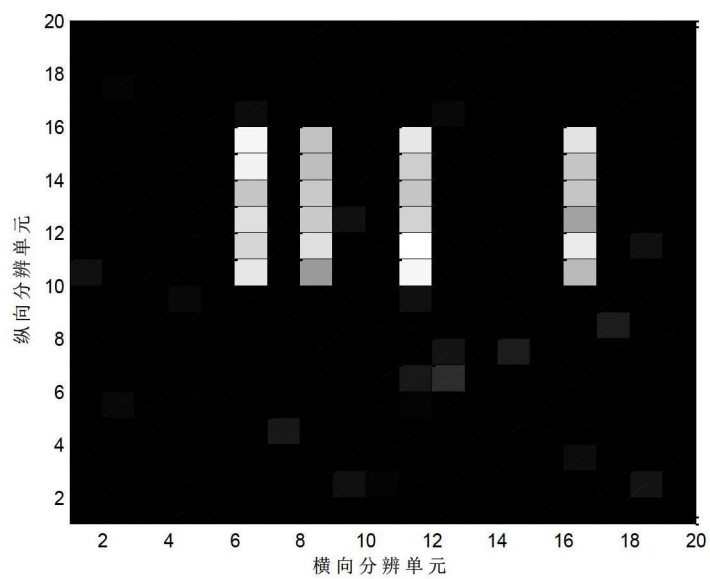


图 7