



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104914440 A

(43) 申请公布日 2015. 09. 16

(21) 申请号 201510348762. 5

(22) 申请日 2015. 06. 23

(71) 申请人 重庆大学

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙坪坝正街
174 号

(72) 发明人 王平 李娜 王思奇 程娜
龚志辉 潘震 杜炜 李刚健

(74) 专利代理机构 北京同恒源知识产权代理有
限公司 11275

代理人 赵荣之

(51) Int. Cl.

G01S 15/89(2006. 01)

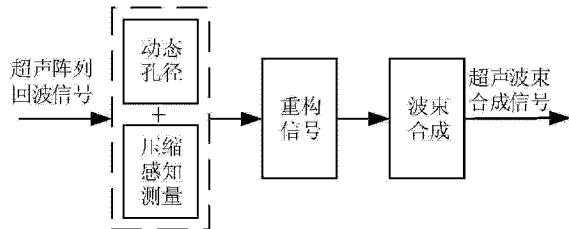
权利要求书2页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成
方法

(57) 摘要

本发明公布了一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法；该方法首先采用 delta 矩阵作为压缩感知理论在超声波束合成系统中的测量矩阵，然后选用余弦变换矩阵作为压缩感知理论的稀疏矩阵，将动态孔径技术与压缩感知理论的测量矩阵进行有机融合，实现融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法；本发明可以减少高采样率给超声成像系统数据采样、传输、存储带来的负担，使获得高纵向分辨的超声图像成为可能；并且动态孔径技术的引入也进一步增大了超声回波信号的稀疏性，减少了采样数据量，提高了近场区域超声图像的横向分辨率。



1. 一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法, 其特征在于, 包括如下步骤:

$$1) \text{ 根据公式 } D\left(\frac{b_k}{2}, F_k\right) = \frac{\left| \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{A}_i \exp(-j\Delta\phi_i) \right|}{\left| \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{A}_i \right|} = 0.707 \text{ 计算聚焦点在深度 } F_k \text{ 下开启的阵元数 } N_k,$$

数 N_k , 在相应深度下开启靠近中心阵元的 N_k 个阵元, 其中 b_k 表示 F_k 处对应的波束宽度, \tilde{A}_i 表示超声探头 i 号阵元的响应复振幅, $\Delta\phi_i$ 表示 i 号阵元波束合成时在计算点与焦点间的超声波相位差, $k = 1, 2, 3, \dots, m$ 表示聚焦点的序数;

2) 将 delta 矩阵作为压缩感知测量矩阵, 并通过其内部的‘0’、‘1’实现超声回波信号的非均匀采样控制, 得到低维超声压缩感知测量信号 y_1 ;

3) 选取 $N \times N$ 维的稀疏矩阵, N 表示超声回波信号的采样长度;

4) 根据超声成像系统实际测量的超声回波信号, 确定实际非均匀测量时超声回波信号的数学模型 $y = \Theta S + e$, $\Theta = \Phi \Psi$, 其中, $y \in C^{M \times 1}$ 是实际非均匀采样的超声回波信号, $\Theta \in C^{M \times N}$ ($M \ll N$) 是感知矩阵, $\Phi \in C^{M \times N}$ 是测量矩阵, $\Psi \in C^{N \times N}$ 是稀疏矩阵, $S \in C^{N \times 1}$ 为超声回波信号的稀疏信号, $e \in C^{N \times 1}$ 为噪声项;

5) 通过求解最优化问题 $\min(\|S\|_{l_1} + \frac{1}{\mu} \|y - \Theta S\|_{l_1})$, 得到超声回波信号的稀疏表示, 其中 μ 为测量矩阵 Φ 的互相关系数, l_1 表示 1 范数, 然后通过稀疏矩阵 Ψ 得到高维超声信号的重构信号 $\hat{x} = \Psi S$;

6) 对重构的超声回波信号 \hat{x} 进行波束合成、得到超声波束合成信号。

2. 根据权利要求 1 所述的融合动态孔径的压缩感知超声波束合成算法, 其特征在于: 所述步骤 1) 具体包括以下子步骤:

$$11) \text{ 根据公式 } D\left(\frac{b_k}{2}, F_k\right) = \frac{\left| \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{A}_i \exp(-j\Delta\phi_i) \right|}{\left| \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{A}_i \right|} = 0.707 \text{ 计算聚焦点在深度 } F_k \text{ 下开启的阵元数 } N_k;$$

12) 根据公式 $S_k = \frac{2f_s F_k}{c}$ 将探测深度 F_k 转换成超声回波信号对应的采样点序数 S_k , 其中 f_s 为 AD 转换器的采样率, c 为超声波的传播速度 1540 米 / 秒。

13) 通过实时监测超声回波信号的采样点数, 当采样点数 n 等于 S_k 时, 将靠近中心阵元的开启数增大至 N_k 。

3. 根据权利要求 1 所述的融合动态孔径的压缩感知超声波束合成算法, 其特征在于: 所述步骤 2) 中具体包括以下子步骤:

21) 根据给定的压缩率 p , 选取 $M \times N$ 维 delta 矩阵作为压缩感知超声成像系统的测量矩阵, 其中 $M = p \cdot N$;

22) 开启 delta 矩阵中元素“1”对应采样信号下的所有动态孔径阵元, 关闭 delta 矩阵

中元素“0”对应的采样信号下的所有阵元。

4. 根据权利要求 1 所述的融合动态孔径的压缩感知超声波束合成算法, 其特征在于 : 所述步骤 3) 具体包括以下子步骤 :

31) 计算基于 Nyquist 采样定理的高维超声回波信号 x , 以 $N \times N$ 维变换矩阵 Ψ 作为稀疏矩阵, 具体变换方法按下式进行 :

$$\Psi = \sqrt{\frac{2}{N}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \cdots & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \frac{1}{2N}\pi & \cos \frac{3}{2N}\pi & \cdots & \cos \frac{2N-1}{2N}\pi \\ \cos \frac{1}{2N}\pi & \cos \frac{3}{2N}\pi & \cdots & \cos \frac{2N-1}{2N}\pi \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos \frac{N-1}{2N}\pi & \cos \frac{3(N-1)}{2N}\pi & \cdots & \cos \frac{(2N-1)(N-1)}{2N}\pi \end{bmatrix}$$

Ψ 是一个正交矩阵, Ψ^T 是 Ψ 的转置矩阵, 且有 $\Psi^T \cdot \Psi = E$, E 为单位矩阵。

5. 根据权利要求 1 所述的融合动态孔径的压缩感知超声波束合成算法, 其特征在于 : 所述步骤 4) 具体包括以下子步骤 :

41) 建立理想情况下低维超声压缩感知测量信号 y_1 的数学模型 $y_1 = \Phi x = \Phi \Psi S = \Theta S$;

42) 在低维超声压缩感知测量信号 y_1 中添加噪声项 e , 建立实际非均匀测量时测量信号 y 的数学模型 $y = \Theta S + e$ 。

6. 根据权利要求 1 所述的融合动态孔径的压缩感知超声波束合成算法, 其特征在于 : 所述步骤 5) 具体包括以下子步骤 :

51) 通过求解最优化问题 $\min(\|S\|_{l_1} + \frac{1}{\mu} \|y - \Theta S\|_{l_1})$, 得到超声回波信号的稀疏表示 \hat{S} , 其

中 μ 为测量矩阵 Φ 的互相关系数;

52) 互相关系数 μ 按下式计算 :

$$\mu(\Phi) = \max_{i \neq j} |\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle|$$

其中, φ_i, φ_j 为测量矩阵 Φ 的列向量, 上式中 $|\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle|$ 表示 φ_i, φ_j 内积后取模, i, j 表示 $1 \sim N$ 的整数;

53) 通过稀疏矩阵 Ψ 得到原始高维超声回波信号的重构信号 $\hat{x} = \Psi \hat{S}$, 其中 $\hat{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 。

7. 根据权利要求 1 所述的融合动态孔径的压缩感知超声波束合成算法, 其特征在于 : 所述步骤 6) 具体包括以下子步骤 :

61) 对重构的超声回波信号 \hat{x} 按下式进行延时叠加波束合成, 得到延时叠加后的超声波束合成信号;

$$S_{DAS}(n) = \sum_{i=0}^{N_i-1} \hat{x}_i [n - (\frac{r}{c} + \tau_i) \cdot f_s]$$

其中 $S_{DAS}(n)$ 为超声波束合成信号, i 表示阵元序数, n 表示采样点数, N_i 表示聚焦的超声阵元总数, r 表示聚焦点与传感器阵列坐标原点间的距离, c 表示超声波波速, τ_i 表示相对传感器阵列中间阵元对第 i 号阵元所施加的聚焦延时, f_s 表示 AD 转换器的采样频率。

一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法

技术领域

[0001] 本发明属于超声成像技术领域，具体涉及一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法。

背景技术

[0002] 在超声成像系统中，为了提高超声图像的纵向分辨率一般通过提高系统的采样率来实现。但高采样率会给超声硬件系统的数据采集、存储和传输带来巨大负担。压缩感知理论 (Compressive sensing, CS) 指出，当信号本身或者在某个变换域上具备稀疏性时，可以通过求解最优化问题从少量采样数据中重构信号的全部信息。超声成像系统中，孔径越大时，波束合成的主瓣将越窄，旁瓣也将越低。但在近场区，孔径越大，波束的扩散角也越大，成像分辨率越差。合理有效的动态孔径控制技术，可以降低近场接收通道的冗余数据，增强超声回波信号的稀疏性。

发明内容

[0003] 鉴于此，本发明的目的是提供一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法。

[0004] 本发明的目的是通过以下技术方案实现的，一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法，包括如下步骤：

$$[0005] 1) \text{ 根据公式 } D(\frac{b_k}{2}, F_k) = \frac{\left| \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{A}_i \exp(-j\Delta\phi_i) \right|}{\left| \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{A}_i \right|} = 0.707 \text{ 计算聚焦点在深度 } F_k \text{ 下开启的}$$

阵元数 N_k ，在相应深度下开启靠近中心阵元的 N_k 个阵元，其中 b_k 表示 F_k 处对应的波束宽度， \tilde{A}_i 表示超声探头 i 号阵元的响应复振幅， $\Delta\phi_i$ 表示 i 号阵元波束合成时在计算点与焦点间的超声波相位差， $k = 1, 2, 3, \dots, m$ 表示聚焦点的序数；

[0006] 2) 将 delta 矩阵作为压缩感知测量矩阵，并通过其内部的‘0’、‘1’实现超声回波信号的非均匀采样控制，得到低维超声压缩感知测量信号 y ；

[0007] 3) 选取 $N \times N$ 维的稀疏矩阵， N 表示超声回波信号的采样长度；

[0008] 4) 根据超声成像系统实际测量的超声回波信号，确定实际非均匀测量时超声回波信号的数学模型 $y = \Theta S + e$ ， $\Theta = \Phi \Psi$ ，其中， $y \in C^{M \times 1}$ 是实际非均匀采样的超声回波信号， $\Theta \in C^{M \times N}$ ($M \ll N$) 是感知矩阵， $\Phi \in C^{M \times N}$ 是测量矩阵， $\Psi \in C^{N \times N}$ 是稀疏矩阵， $S \in C^{N \times 1}$ 为超声回波信号的稀疏信号， $e \in C^{N \times 1}$ 为噪声项；

[0009] 5) 通过求解最优化问题 $\min(\|S\|_{l_1} + \frac{1}{\mu} \|y - \Theta S\|_{l_1})$ ，得到超声回波信号的稀疏表示，

其中 μ 为测量矩阵 Φ 的互相关系数， l_1 表示 1 范数，然后通过稀疏矩阵 Ψ 得到高维超声信号的重构信号 $\hat{x} = \Psi \hat{S}$ ；

[0010] 6) 对重构的超声回波信号 \hat{x} 进行波束合成、得到超声波束合成信号。

[0011] 由于采用了上述技术方案,本发明具有如下的优点:

[0012] 本发明公布了一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法;该方法首先采用 delta 矩阵作为压缩感知理论在超声成像系统中的测量矩阵,然后选用余弦变换矩阵(DCT)作为压缩感知理论的稀疏矩阵,实现压缩感知理论在超声成像系统中的应用,在此基础上,本方法将动态孔径技术与压缩感知理论的测量矩阵相融合,实现了融合动态孔径的压缩感知超声波束合成算法。本发明可以减少高采样率给超声成像系统数据采样、传输、存储带来的沉重负担,使获得高采样率下高纵向分辨的超声图像成为可能;另外,动态孔径的融入也进一步增大了超声回波信号的稀疏性,减少了采样数据量,提高了近场区域超声图像的横向分辨率。

附图说明

[0013] 为了使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图对本发明作进一步的详细描述,其中:

[0014] 图 1 为本发明一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法流程图;

[0015] 图 2 给出了动态孔径技术孔径大小随探测深度变化的原理示意图;

[0016] 图 3 给出了基于 delta 矩阵的压缩感知采样示意图;

[0017] 图 4(a)、(b) 分别给出了压缩感知随机采样全孔径和动态孔径阵元控制方法示意图。

具体实施方式

[0018] 以下将结合附图,对本发明的优选实施例进行详细的描述;应当理解,优选实施例仅为了说明本发明,而不是为了限制本发明的保护范围。

[0019] 本发明提供一种融合动态孔径的压缩感知超声波束合成方法,针对传统高采样率下的超声波束合成算法进行了改进,包括如下步骤:

$$[0020] (1) \text{ 根据公式 } D\left(\frac{b_k}{2}, F_k\right) = \frac{\left| \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{A}_i \exp(-j\Delta\varphi_i) \right|}{\left| \sum_{i=1}^{N_k} \tilde{A}_i \right|} = 0.707(-3dB) \text{ 计算聚焦点在深度 } F_k \text{ 下开启}$$

的阵元数 N_k ;将探测深度 F_k 转换成超声回波信号对应的采样点序数 S_k ;通过实时监测超声回波信号的采样点数,当采样点数 n 等于 S_k 时,增大靠近中心阵元的开启数,其中 b_k 表示 F_k 处对应的波束宽度, \tilde{A}_i 表示超声探头 i 号阵元的响应复振幅, $\Delta\varphi_i$ 表示 i 号阵元波束合成时在计算点与焦点间的超声波相位差, $k = 1, 2, 3, \dots, m$ 表示聚焦点的序数;

[0021] (2) 根据给定的压缩率 p ,选取 $M \times N$ 维 delta 矩阵作为压缩感知超声成像系统的测量矩阵,其中 $M = p \cdot N$;然后开启 delta 矩阵中元素“1”对应采样信号下的所有动态孔径阵元,关闭 delta 矩阵中元素“0”对应的采样信号下的所有阵元。

[0022] (3) 计算基于 Nyquist 采样定理的传统采样方式下的高维超声回波信号 x ,采样长度 N ,设计 $N \times N$ 维变换矩阵 Ψ 作为稀疏矩阵,具体变换方法按下式进行:

$$[0023] \quad \Psi = \sqrt{\frac{2}{N}} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \cdots & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos \frac{1}{2N}\pi & \cos \frac{3}{2N}\pi & \cdots & \cos \frac{2N-1}{2N}\pi \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cos \frac{N-1}{2N}\pi & \cos \frac{3(N-1)}{2N}\pi & \cdots & \cos \frac{(2N-1)(N-1)}{2N}\pi \end{bmatrix}$$

[0024] Ψ 是一个正交矩阵, Ψ^T 是 Ψ 的转置矩阵, 且有 $\Psi^T \cdot \Psi = E$, E 为单位矩阵。

[0025] (4) 建立理想情况下压缩感知测量信号 y 的数学模型 $y_1 = \Phi x = \Phi \Psi S = \Theta S$; 并在压缩感知测量信号 y_1 中添加噪声项 e , 建立实际非均匀测量时测量信号 y 的数学模型 $y = \Theta S + e$; 其中 $y \in C^{M \times 1}$ 是实际非均匀采样的超声回波信号, $\Theta \in C^{M \times N}$ ($M \ll N$) 是感知矩阵, $\Phi \in C^{M \times N}$ 是测量矩阵, $\Psi \in C^{N \times N}$ 是稀疏矩阵, $S \in C^{N \times 1}$ 为超声回波信号的稀疏信号, $e \in C^{N \times 1}$ 为噪声项;

[0026] (5) 通过求解最优化问题 $\min(\|S\|_{l_1} + \frac{1}{\mu} \|y - \Theta S\|_{l_1})$, 得到超声回波信号的稀疏表示 \hat{S} , 其中 μ 为测量矩阵 Φ 的互相关系数, l_1 表示 1 范数, 然后通过稀疏矩阵 Ψ 得到高维超声信号的重构信号 $\hat{x} = \Psi \hat{S}$;

[0027] 其中 μ 为测量矩阵 Φ 的互相关系数, 按下式计算:

[0028]

$$\mu(\Phi) = \max_{i \neq j} |\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle|$$

[0029] 其中, φ_i, φ_j 为测量矩阵 Φ 的列向量, 上式中 $|\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle|$ 表示 φ_i, φ_j 内积后取模, i, j 表示 $1 \sim N$ 的整数。

[0030] 然后通过稀疏矩阵 Ψ 得到原始超声回波信号的精确或者近似重构信号 $\hat{x} = \Psi \hat{S}$, 其中 $\hat{x} \in C^{N \times 1}$;

[0031] (6) 对重构的超声回波信号 \hat{x} 按下式进行延时叠加波束合成, 得到延时叠加后的超声波束合成信号;

$$[0032] \quad S_{DAS}(n) = \sum_{i=0}^{N_1-1} \hat{x}_i [n - (\frac{r}{c} + \tau_n) \cdot f_s]$$

[0033] 其中 $S_{DAS}(n)$ 为超声波束合成信号, i 表示阵元序数, n 表示采样点数, N_1 表示聚焦的超声阵元总数, r 表示聚焦点与传感器阵列坐标原点间的距离, c 表示超声波波速, τ_i 表示相对传感器阵列中间阵元对第 i 号阵元所施加的聚焦延时, f_s 表示 AD 转换器的采样率。

[0034] 图 1 是融合动态孔径的压缩感知超声波束合成算法流程图, 在对超声回波信号压缩感知采样阶段应用动态孔径技术, 将动态孔径技术与压缩感知理论中的测量矩阵进行了有机融合, 然后对非均匀测量得到的信号通过最优化问题求解进行压缩感知重构, 接着将重构后的高维超声回波进行波束合成、正交解调以及对数压缩等处理过程并成像, 形成一幅完整的超声图像。

[0035] 图 2 是动态孔径技术原理示意图, 动态孔径技术开启的有效孔径数随探测深度增

加而逐渐增多,直至全部打开。在整个探测区域,动态孔径技术可以使声场的波束宽度保持不变。

[0036] 图 3 是三种压缩感知随机采样的示意图,该随机采样方式在扫描方向和探测深度上的采样点都具有随机性。该采样方式用 delta 矩阵实现时,每条扫描线对应的 delta 矩阵不相同,但维数相同。压缩感知理论的应用,减少了超声成像系统的聚焦延时参数,降低了高采样率对超声成像系统硬件的要求

[0037] 图 4 给出了压缩感知随机采样全孔径和动态孔径阵元控制方法示意图,当采样点信号为“1”时表示该点信号采样,超声传感器阵元开启;当采样点信号为“0”时,表示该采样点信号被舍弃,超声传感器阵元通道关闭。图 4(b) 融入动态孔径技术,采样信号“0”处全部关闭,采样信号“1”处开启相应深度下中心阵元处所对应的开启阵元数 N_k 。动态孔径技术的应用,进一步减轻了数据存储与传输给超声成像系统带来的负担,加大了采样信号的稀疏性,有助于提高压缩感知重构信号的精度。另外,动态孔径技术的应用降低了超声图像的旁瓣等级,提高了超声图像质量。

[0038] 以上所述仅为本发明的优选实施例,并不用于限制本发明,显然,本领域的技术人员可以对本发明进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样,倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内,则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

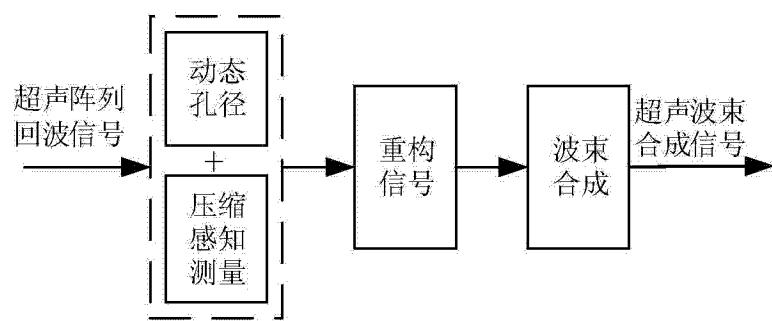


图 1

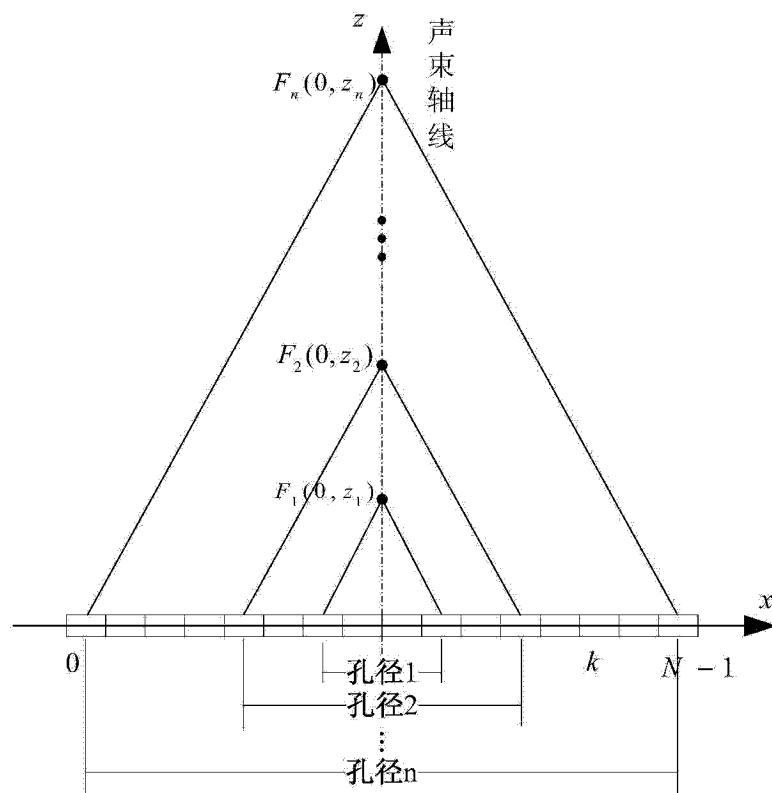


图 2

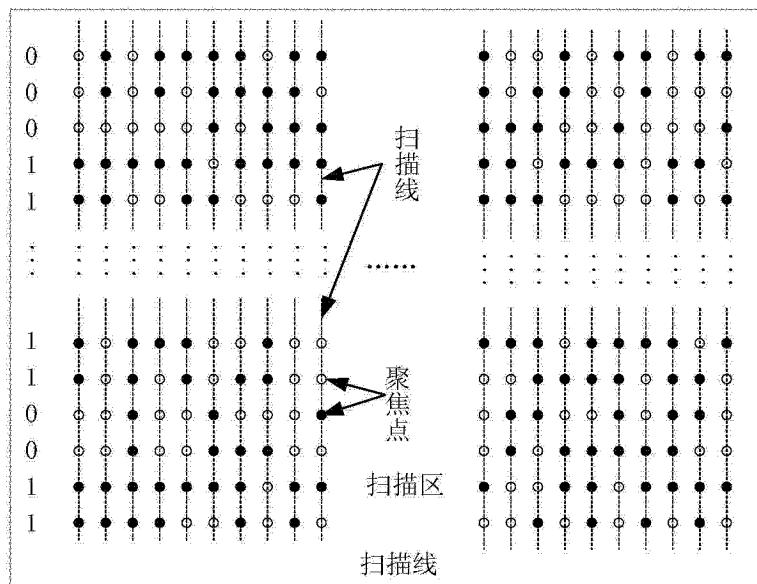


图 3

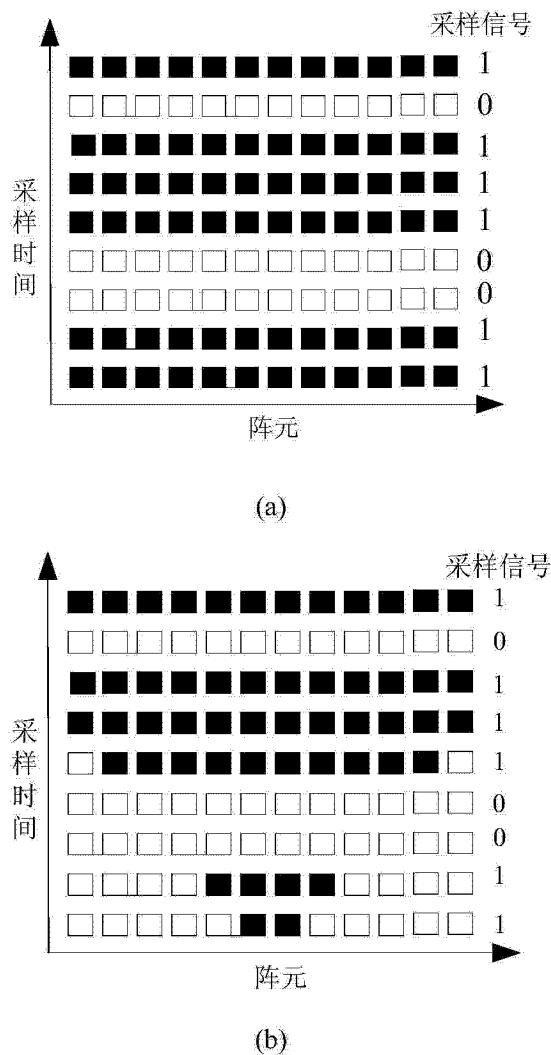


图 4