

文章编号: 2095-4980(2015)04-0569-05

超材料压缩感知成像技术

白佳俊, 陈 强, 陈 亮, 付云起

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 基于超材料和压缩感知理论设计了一套简便的快速成像系统, 可用于毫米波及太赫兹(THz)成像, 具有结构简单, 成像速度快, 在不同频段移植性强等优点。系统采用超材料结构互补(CELC)单元设计单通道成像口径, 实现了对信息的物理层压缩。基于口径在不同频率辐射特性的不相关性, 构造测量矩阵, 以扫频方式实现对目标场景的稀疏测量, 最后采用两步迭代阈值(TwIST)算法实现对目标场景的重构。已完成 K 波段、THz 波段成像口径设计, 以及 K 波段成像仿真实验, 40 cm 成像口径理论上具备 4.6 cm 的距离分辨力和 1.3° 的角度分辨力。

关键词: 超材料; 压缩感知; 成像

中图分类号: TN832⁺.8

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201504.0569

Compressive Sensing imaging technology based on metamaterial

BAI Jiajun, CHEN Qiang, CHEN Liang, FU Yunqi

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

Abstract: A simple and rapid imaging system based on metamaterials and Compressed Sensing(CS) theory is designed, which can be used in millimeter wave and THz imaging with a simple structure and good portability in different frequency bands. The system has a single-channel imaging aperture composed of metamaterial structure Complementary Electric-LC(CELC) unit, then the information can be compressed on the physical layer. Because of the irrelevance of aperture's radiation characteristics under different frequencies, the frequencies are swept to achieve multiple measurements. By using the Two-step Iterated Soft Thresholding(TwIST) algorithm, the scenes are reconstructed. The imaging aperture designs of K-band and terahertz band are completed as well as the simulation test of imaging in K band. For a 40 cm imaging aperture, a range resolution of 4.6 cm and an angular resolution of 1.3° can be reached theoretically.

Key words: metamaterial; Compressive Sensing; imaging

传统的成像系统往往基于 Nyquist 采样定理, 要想获得高分辨力最直接的办法就是提高采样率, 而数据压缩过程则会丢弃大量的冗余数据, 这种高速采样再压缩的过程浪费了大量的采样资源, 这也说明 Nyquist 采样定理存在一定的局限性。

2004 年 Candes 和 Tao^[1-3]等人提出了压缩感知(CS)理论, 该理论表明对于稀疏信号, 可通过观测矩阵将高维信号投影到低维空间, 然后通过求解优化问题从这些少量的投影中高概率重构出原始信号。2008 年 WaiLam Chan^[4]等对 CS 理论在 THz 成像中的应用进行了探索性研究, 研制出了单像素 THz 成像系统, 但每次测量都需要切换掩模板。2013 年美国杜克大学的 John Hunt 等利用超材料结合 CS 理论设计了工作于 K 波段(18.5 GHz~25 GHz)的一维^[5]和二维成像口径^[6-7], 不需要透镜和随机掩模板等部件即可实现对场景的快速成像。

本文基于 CS 理论, 参照文献[5]利用超材料结构 CELC 单元设计单通道成像口径, 实现了对信息的物理层压缩, 减少了数据的采样和传输压力。基于成像口径在不同频率辐射特性的不相关性, 构造测量矩阵, 以扫频方式实现对目标场景的稀疏测量, 最后采用两步迭代阈值(TwIST)算法实现对目标场景的重构。本文主要完成了 K 波段(18 GHz~26 GHz)和 THz 频段(0.12 THz~0.18 THz)成像口径的仿真设计, 并对 K 波段口径进行了成像仿真实验, 获得了较理想的实验结果。

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2014-12-24

基金项目: 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(CAEP THZ201308); 教育部新世纪优秀人才资助计划(NCET-10-0894)

1 超材料压缩感知成像理论及模型

1.1 压缩感知理论基础

压缩感知的 3 个要素是信号的稀疏变换、稀疏信号的非相关测量及稀疏信号的重建算法。信号的稀疏性可简单理解为信号中非 0 元素数目较少,自然界存在的真实信号一般不是绝对稀疏,但在某个变换域下近似稀疏。

压缩感知采用的数学模型见图 1,在方程组 $\mathbf{Y}=\mathbf{A}\mathbf{X}$ 中, $\mathbf{X}$ 是大小为 $N \times 1$ 的待测信号, $\mathbf{A}$ 是 $M \times N$ 的测量矩阵,其中 $M < N$, $\mathbf{Y}$ 为大小为 $M \times 1$ 的测量值,即待测信号在测量矩阵 $\mathbf{A}$ 上的投影值。由于 $\mathbf{A}$ 是一个扁矩阵,方程组有无穷多解。若上式中的 $\mathbf{A}$ 满足有限等距性质(Restricted Isometry Property, RIP),

即对于 K 稀疏信号 $\mathbf{X}$ 和常数 $\delta_k \in (0,1)$,矩阵 $\mathbf{A}$ 满足: $1 - \delta_k \leq \frac{\|\mathbf{A}\mathbf{X}\|_2^2}{\|\mathbf{X}\|_2^2} \leq 1 + \delta_k$ 。

则上述问题与 L_1 范数优化问题的解一致, K 个系数可由 M 个测量值准确重构。 L_1 最小范数下最优化问题又称为基追踪,实现算法较多,如匹配追踪法、正交匹配追踪法和迭代阈值法^[8]。

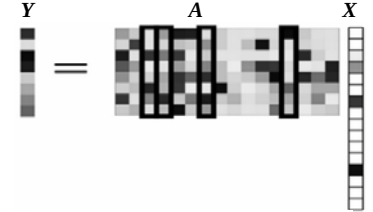


Fig.1 Mathematical model of CS
图 1 压缩感知的数学模型

1.2 超材料压缩感知成像模型

首先将成像目标区域离散化为 N 个小区域(N 像素),则目标的散射场分布特性可用 $f(n)$ 表示(n 为目标场景中的不同位置)。当成像分辨率足够高时,第 n 个小区域对应的散射场可以近似为一个固定值 f_n 。

假设发射端和接收端到达区域 n 的传输函数分别为 E_n^{tx} 和 E_n^{rx} (目标处于天线远场区,考虑空间位置的差别),则发射信号(幅度为 1)经过目标散射后被接收的信号(测量信号)为:

$$E_d = \sum_{n=1}^N E_n^{tx} E_n^{rx} f_n = [h_1 \quad h_2 \quad \cdots \quad h_N] \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix}, \quad h_n = E_n^{rx} E_n^{tx}$$

传统扫描成像体制需要通过聚焦方法来测量得到 N 点 f 值,而此处一次测量得到的是 N 点反射信号的总和,当有 M 组不同的发射/接收测量组合时,可得到 M 个不同的测量值。

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \cdots & h_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix}, \quad h_{mn} = E_{mn}^{rx} E_{mn}^{tx} \quad (1)$$

式(1)可表示为 $\mathbf{g}=\mathbf{H}\mathbf{f}$, $\mathbf{H}$ 为测量矩阵。按照 CS 成像理论,若想精确重构得到 $\mathbf{f}$ 值,只需 $\mathbf{f}$ 具备稀疏性以及测量矩阵满足 RIP 条件。

对于散射目标较少且分散的稀疏场景, f_n 只有少数非零值,故信号 $\mathbf{f}$ 满足稀疏性;对于散射目标较多的非稀疏场景,可通过适当的稀疏基进行稀疏变换,本文首先针对稀疏场景进行研究。采用超材料成像口径,建立以频率为索引的多次测量,在不同频率下成像口径对应的辐射场分布互异,由此构造测量矩阵具有较好的不相关性。

在得到 M 次测量结果之后,需要对信号进行重建,采用两步迭代阈值法,先在稀疏域获得原始信号的变换系数,然后由确定的阈值对变换系数进行收缩处理,其核心是利用前一次的估计值和变换域的阈值,处理得到新的估计值,迭代进行直到满足停止条件。

2 超材料成像口径设计

利用超材料口径进行成像测量时,信号在设计带宽内进行扫频,就可以获得不同测量模式的测试结果,不需要口径做任何移动和改变。现在最为关键的问题是如何保证不同测量模式之间的不相关性,成像口径的具体结构为在微带传输线的带线上蚀刻 CELC 超材料单元,通过控制单元本身的设计和在成像口径上的分布,就能够得到任意想要的口径模式。在进行测量时,相邻的 2 个频率(对应 2 次测量)必须具有一定的间隔。因此在有限的工作带宽内,这将决定测量次数并最终影响图像信号重建精确度。

2.1 CELC 单元参数设计

常见的超材料单元形式如开口谐振环(Split Resonator Ring, SRR)、ELC、CELC 等都有较强的谐振特性。项目中采用 CELC 单元, 单元结构及参数如图 2 所示, 右边是其等效电路模型。



Fig.2 Structure parameters and the equivalent circuit model of CELC
图 2 CELC 单元参数及等效电路

为了使成像口径在工作频段内有足够多的测量模式, 需要谐振单元有较强的谐振特性, 即高 Q 值, 这样在有限的带宽内就能实现尽可能多的测量次数, 提高信号重构的精确度。

CELC 单元的谐振特性与 ELC 单元相似, 由上图的等效电路可知, 类似于 RLC 带通网络, 缝隙的宽度、长度都会影响等效电阻、电容、电感, 进而影响单元的谐振特性。由公式可知: $f = 1/\sqrt{LC}$, $Q_{\text{series}} = R\sqrt{C/L}$, $Q_{\text{parallel}} = R^{-1}\sqrt{L/C}$ 。

通过调整 CELC 单元的各个参数可得到不同谐振频率、不同 Q 值的谐振结构。为了简化设计, 利用全波仿真软件 HFSS 优化所有可变参数, 使 CELC 单元的谐振频率可以在工作波段内只由一个参数进行控制。由图 3 可知, 口径工作于 K 波段时, 在其他参数不变的情况下, L 在 0.5 mm~1.5 mm 范围内变化, 单元的谐振特性发生了显著的有规律变化, 随着 L 的变大, 单元谐振频率逐步降低, 同时 Q 值逐步增大, 因此选取 L 作为控制 CELC 单元谐振频率的变量。

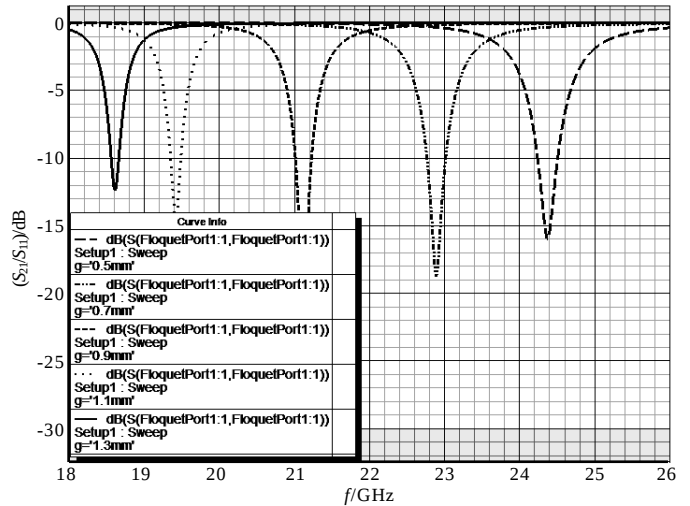


Fig.3 Relationship between the resonant characteristic of unit and the L parameter
图 3 单元谐振特性与 L 的关系

2.2 一维成像口径设计

成像口径实际上是一个漏波波导——在标准微带线结构上光刻 CELC 单元, 因此首先要分析微带线的传输特性, 使其在毫米波波段甚至太赫兹波段有良好的传输特性。微带线中的主模是准 TEM 模, 为了有效地传输主模, 需要设计微带线的结构尽可能地抑制高次模的出现。微带线加载单个 CELC 单元结构见图 4。

研究微带线结构加载单个 CELC 单元的辐射特性, 在 K 波段, 当 L 在 0.6 mm~1.8 mm 范围内变化时, 口径的辐射特性见图 5(a), 通过 L 长度的变化可实现谐振频率在 18 GHz~26 GHz 范围内变化。将 K 波段的超材料口径按比例缩放并优化相关参数, 当 L 的长度在 0.075 mm~0.27 mm 变化时, 可实现单元谐振频率在 0.12 THz~0.18 THz 频段内变化, 见图 5(b)。

通过将不同谐振频率的 CELC 单元随机分布在微带线上, 每个单元都能从导波结构中耦合能量向自由空间辐射, 这样就形成了可工作于多个谐振频率的一维成像口径, 同时单元间的耦合作用会使不同谐振频率的谐振特性的变化更加不规律。图 6 为微带线结构加载 41 个 CELC 单元结构图及口径的传输特性, 口径工作于 K 波段。

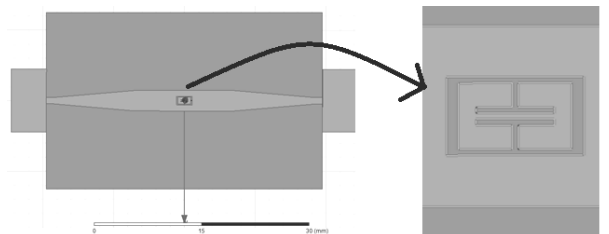


Fig.4 Aperture with single CELC unit
图 4 微带线加载单个 CELC 单元

取图 6 中的 3 个谐振点 19.82 GHz, 20.24 GHz, 22.92 GHz 分别观察其辐射方向图, 从图 7 的形状上看三者不相关性较强。

3 成像实验仿真验证

利用 HFSS 建模完成了如图 8 的实验系统, 场景照射源采用低方向性的喇叭天线, 喇叭天线与接收口径在同一水平面, 照射目标为直径 10 cm 的金属片(可以设置多个目标), 目标与口径之间距离为 1.5 m~4 m。

测得成像口径的辐射场分布后用于构造 $M \times N$ 维测量矩阵, M 为有效的测量次数, 由口径在不同频率的辐射特性的不相关性决定, N 为待测目标的信息维数, 由目标场景空间大小和口径的分辨力决定。利用 Matlab 对场景进行了简化模拟, 将场景中目标对辐射信号的反射情况理想化为 0 和 1 信号, 即在有目标的地方 f 设置为 1, 没有目标的地方设置为 0。利用仿真得到的一维超材料口径的场分布构造测量矩阵 H , 可以得到模拟的测量值 $g = Hf$, 之后利用 g 和 H 来重构测量场景。由图 9 可知, 对于场景中有少量目标的情况, 利用超材料口径不同频率的场分布构造的测量矩阵 H , 可以通过少量的测量次数实现场景中目标位置的精确重构, 40 cm 成像口径具有 1.7° 角度分辨力和 4.6 cm 的距离分辨力。重构算法采用两步迭代阈值算法—TwIST。

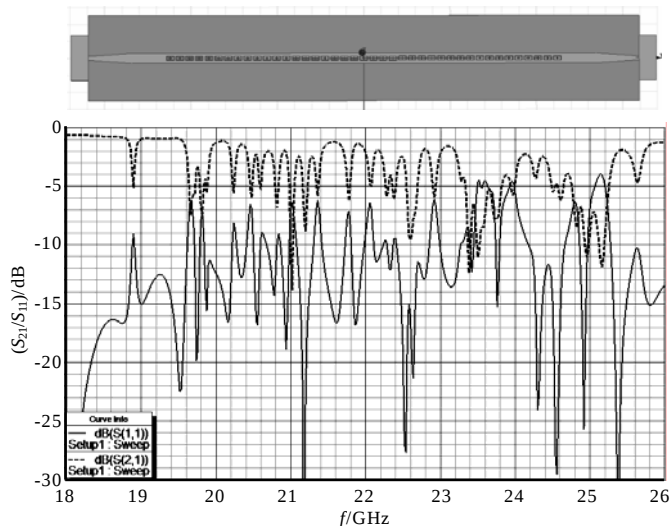
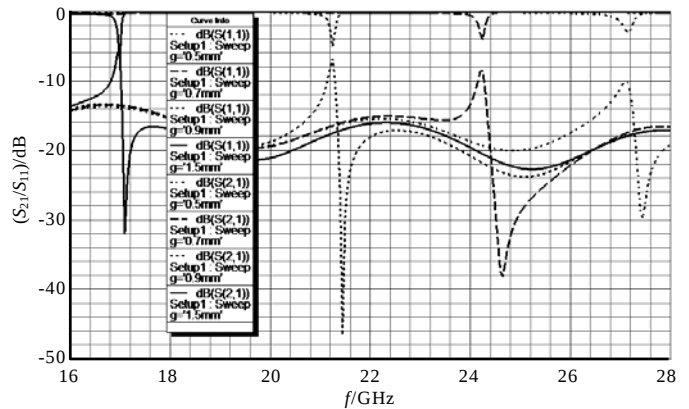
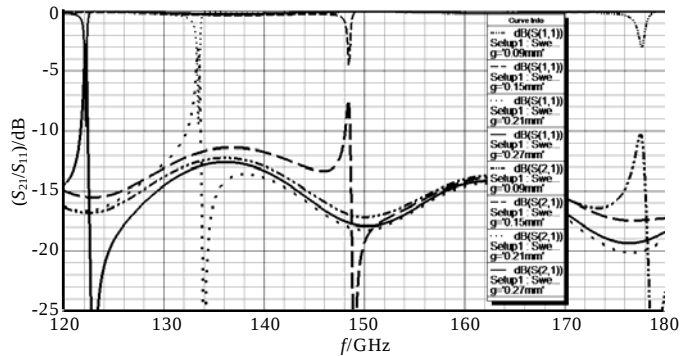


Fig.6 S-parameter of the aperture with 41 CELC units
图 6 加载 41 个 CELC 单元口径及辐射特性



(a) S-parameter of the aperture with single CELC unit in K band



(b) S-parameter of the aperture with single CELC unit in THz band

Fig.5 S-parameter of the aperture with single CELC unit

图 5 加载单个 CELC 单元口径的辐射特性

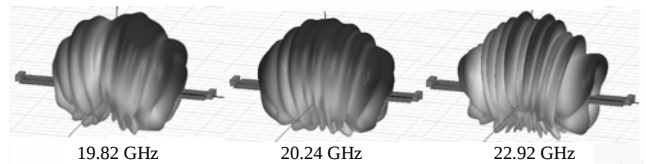


Fig.7 3D far-field of the aperture at three different frequencies

图 7 三个谐振点处的辐射方向图

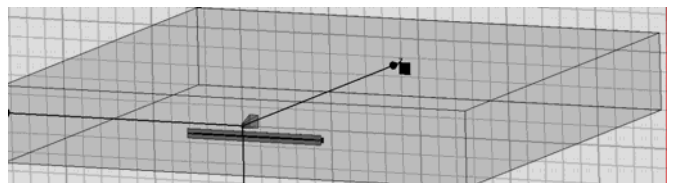


Fig.8 Model of simulation experiment

图 8 模拟实验场景

4 结论

本文根据压缩感知理论中对测量矩阵的要求设计了基于超材料结构 CELC 单元的一维成像口径, 在 K 波段不容易实现对目标的高分辨成像, 但是可以实现对大金属目标的定位(距离像和方位像)。当口径工作在 0.12 THz~0.18 THz 甚至更高频率时可以得到近似成比例变高的分辨力, 可用于安检等多种场合。

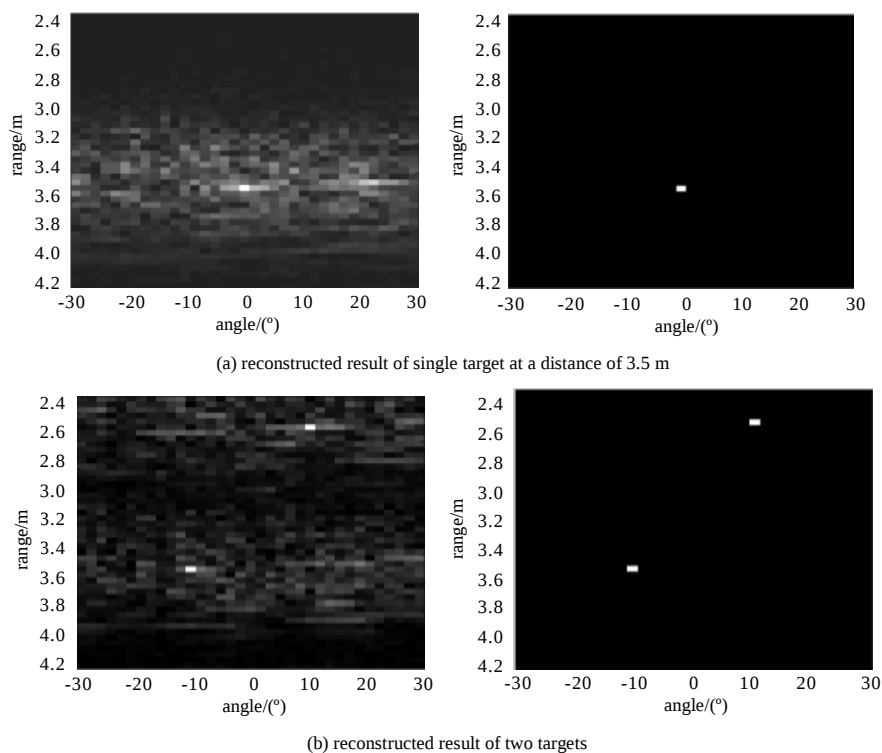


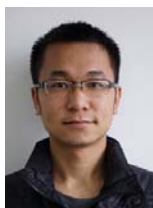
Fig.9 Reconstructed results

图9 重构结果

参考文献:

- [1] Candes E, Tao T. Near optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies? [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406–5425.
- [2] Candes E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete Fourier information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489–509.
- [3] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [4] Wai Lam Chan, Kriti Charan, Dharmal Takhar. A single pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(12): 121105.
- [5] John Hunt, Tom Driscoll, Alex Mrozack, et al. Metamaterial apertures for computational imaging [J]. Science, 2013, 339(1): 310–313.
- [6] Lipworth G, Mrozack A, Hunt J, et al. Metamaterial apertures for coherent computational imaging on the physical layer [J]. Optical Society of America, 2013, 30(8): 1603–12.
- [7] Lipworth G, Mrozack A, Hunt J, et al. Simulations of 2D metamaterial apertures for coherent computational imaging [C]// IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. Tel Aviv: [s.n.], 2013: 1–4.
- [8] LIU Jiying, ZHU Jubo, LU Chuan, et al. High-quality, quantum imaging algorithm and experiment based on compressive sensing [J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1206–8.

作者简介:



白佳俊(1990–), 男, 山西省晋中市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术. email: baijiajun1990@163.com.

陈 强(1991–), 男, 河南省信阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

陈 亮(1990–), 男, 福建省龙岩市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

付云起(1975–), 男, 天津市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场与微波技术.