

引用格式:徐枫,朱莉,李小辉,等.基于Stolt算法的毫米波全息二维成像优化[J].电光与控制,2019,26(2):62-65. XU F, ZHU L, LI X H, et al. Stolt algorithm based two-dimensional millimeter-wave holographic imaging optimization[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(2):62-65.

## 基于 Stolt 算法的毫米波全息二维成像优化

徐枫, 朱莉, 李小辉, 刘敏

(南京理工大学电光学院探测与控制工程系, 南京 210094)

**摘要:** 针对在毫米波全息成像算法过程中像素点存在一定程度的发散、分辨清晰度不够高的问题,提出 Stolt 插值优化算法,该算法根据单元格内各个数据点与中心的距离,取加权平均值进行插值。与传统的插值算法相比较,该算法使得各个像素点进一步收敛,成像更加清晰,同时计算量不会有较大的变化。最后通过横断面仿真实验证明了该算法的有效性。

**关键词:** 毫米波; 全息成像; 二维横断面像; Stolt 优化算法

**中图分类号:** TN015      **文献标志码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.02.013

## Stolt Algorithm Based Two-Dimensional Millimeter-Wave Holographic Imaging Optimization

XU Feng, ZHU Li, LI Xiao-hui, LIU Min

(Department of Detection and Control Engineering, Electro-Optical Institute, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To solve the problems that the pixels in the millimeter-wave holographic imaging algorithm have a certain degree of divergence and that the resolution sharpness is not high enough, a Stolt interpolation optimization algorithm is proposed. According to the distance between each data point in the cell and the center, a weighted average value is used for interpolation. Compared with the traditional interpolation algorithm, the algorithm makes each pixel further converge, and the imaging clearer, while the amount of computation will not be greatly changed. Finally, the cross-section simulation experiment proves the effectiveness of the algorithm.

**Key words:** millimeter wave; holographic imaging; two-dimensional cross-section image; Stolt optimization algorithm

### 0 引言

毫米波和微波相比,由于频率更高,所以在分辨率上更具有优势,同时兼具红外以及可见光的特性,并保持了一定强度的穿透力,得益于该强度的穿透力能够做到对隐匿物体的探测。同时毫米波能够进行全时段的工作,得益于以上优势毫米波被应用到成像技术中,特别是在近场成像中得到广泛应用,例如医疗过程中成像、隐匿物品的检测、场馆安检系统、近场的目标探测等<sup>[1-2]</sup>。

近场宽带全息成像作为窄带全息成像的进阶技术,对其成像算法的研究尚有较大的空间<sup>[3-4]</sup>。本文

将从宽带全息成像原理入手,对基于该成像算法的二维横断面像进行原理解释、算法处理的分析,进而对如何提高成像质量进行讨论,并且通过对引入的 Stolt 插值算法优化处理,进一步实现对近场二维横断面像成像质量的提升。

### 1 近场横断面成像算法原理

二维横断面成像的扫描方式与冠状面扫描方式有所不同,天线沿  $O'X'$  轴方向以一步一停的方式发射步进频率脉冲,对目标进行扫描,且只需扫描  $Y'=0$  这一行,扫描方式与传统合成孔径雷达成像方式较为相似。在  $Y'=0$  行处,接收单元接收各个目标点的回波信号,并将回波信号记为  $s(x, k, z = z_0)$ ,横断面成像目标即获取  $XOZ$  平面目标各散射中心反射系数的等效分布  $g(x, z)$ <sup>[5]</sup>。成像模型如图 1 所示。

收稿日期:2018-01-26

修回日期:2018-12-13

作者简介:徐枫(1994—),男,江苏南京人,硕士生,研究方向为全息成像技术。

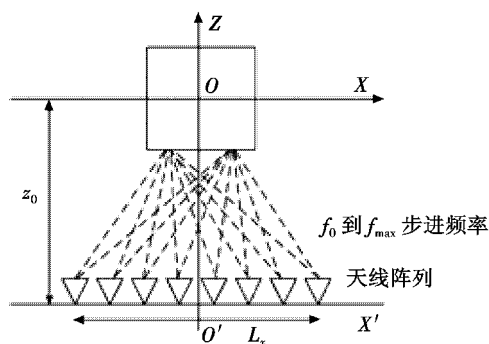


图1 基于直线阵列二维横断面成像模型  
Fig.1 Two-dimensional cross-sectional imaging model based on linear array

下面利用波谱理论进行成像算法推导<sup>[6]</sup>。

设点  $O'(x=0, z=z_0)$  为中心,附近区域电场分布为  $E(x, z; x=0, z=z_0)$ , 区域平面和坐标平面  $XOZ$  平行;以点  $O(x=0, z=0)$  为中心的附近区域电场分布为  $E(x, z; x=0, z=0)$ , 区域平面同样和坐标平面  $XOZ$  平行,具体到横断面成像问题中,目标区域电场分布  $E(x, z; x=0, z=0)$  等价于待求目标的像函数  $g(x, z, y=0)$ 。因为采用步进频信号一维横向采样的测量方式,所以得到的散射数据可以认为是不同波数  $k$  时,电场分布  $E(x, z; x=0, z=z_0)$  在  $z=z_0$  的值,写为  $E(x, k; x=0, z=z_0)$ 。以下对二维横断面成像进行波谱推导<sup>[7]</sup>。

首先对  $E(x, k; x=0, z=z_0)$  沿变量  $x$  做傅里叶变换,将回波采样数据变换到波数域,得到

$$F(k_x, k; x=0, z=z_0) = \int E(x, k; x=0, z=z_0) e^{-jk_x x} dx \quad (1)$$

然后构建波数域相位补偿因子,即空间滤波函数  $H(k_x, k_z)$ , 该函数可表示为

$$H(k_x, k_z) = \text{rect}\left(\frac{|k_x|}{k_x^2 + k_z^2}\right) e^{jk_x z_0} \quad (2)$$

匹配滤波后可由测量平面波谱  $F(k_x, k; x=0, z=z_0)$  完成到目标平面波谱  $F(k_x, k; x=0, z=0)$  的转换,即

$$F(k_x, k; x=0, z=0) = F(k_x, k; x=0, z=z_0) \cdot \text{rect}\left(\frac{|k_x|}{k_x^2 + k_z^2}\right) e^{jk_x z_0} \quad (3)$$

但是波谱中的  $k$  和  $k_x$  为非正交关系,需要将  $k_x - k$  转换到  $k_x - k_z$  域内再进行逆傅里叶变换,所以要利用色散关系完成转换。

空间域频率  $k_x, k_z$  与波数矢量  $k$  满足色散关系

$$k_x^2 + k_z^2 = k^2 \quad (4)$$

经过代换之后原本在  $k_x - k$  域下均匀分布的回波数据变换到  $k_x - k_z$  域下显然是不均匀的,所以变换过程需要借助 Stolt 插值算法实现,从均匀分布的  $k_x - k$  域数据得到分布均匀的  $k_x - k_z$  域数据。最终的算式为

$$E(x, z) =$$

$IFFT_{(k_x, k_z)}(\text{stolt}_{k-k} \{FFT_x[E(x, z; x=0, z=z_0)] e^{jk_x z}\}) \quad (5)$   
再对插值完的  $F(k_x, k_z; x=0, z=0)$  进行逆傅里叶变换就能够得到  $E(x, z; x=0, z=0)$ , 也就是得到了待求目标的像函数  $g(x, z, y=0)$ 。

以上说明了二维横断面成像算法推导过程<sup>[8]</sup>。

所以基于 Stolt 插值算法的波数域相位补偿横断面成像算法的具体步骤如下:

- 1) 对回波采样数据做方位向快速傅里叶变换,将其变换至波数域;
- 2) 根据天线阵列方位构建波数域相位补偿因子;
- 3) 利用相位补偿因子对回波信号做匹配滤波;
- 4) 对滤波后的数据进行 Stolt 插值,实现数据在  $k_x - k_z$  域内的均匀分布;
- 5) 对  $k_x - k_z$  域内数据做二维逆傅里叶变换,从而得到横断面像。

图2所示为二维横断面成像流程图。

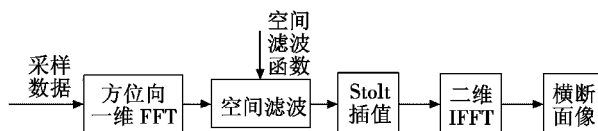


图2 二维横断面成像流程图

Fig.2 Flow chart of two-dimensional cross-sectional imaging

## 2 Stolt 插值算法原理

波谱矩阵  $F(k_x, k; x=0, z=0)$  的元素在  $k_x - k$  平面域内均匀分布,它们的对应坐标位置如图3所示。

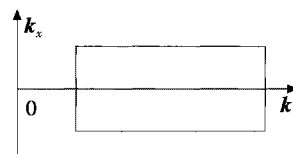


图3  $k_x - k$  域数据分布情况

Fig.3 Data distribution in  $k_x - k$  domain

根据色散关系式  $k^2 = k_x^2 + k_z^2$ , 将图3所示矩形数据转化到  $k_x - k_z$  域内,则对应数据矩阵在  $k_x - k_z$  中位置如图4中实线所示。

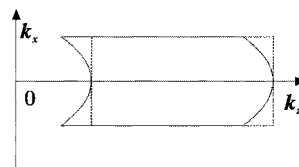


图4  $k_x - k_z$  域数据分布情况

Fig.4 Data distribution in  $k_x - k_z$  domain

由图4可知,原本在  $k_x - k$  域分布均匀的数据,在色散关系式的作用下,对应  $k_x - k_z$  域的数据矩阵并不均匀。在  $k_z$  取最大值和最小值的两端呈双曲线分布,且随  $k_z$  增大而变得稠密。Stolt 插值的目的在于求取

图4虚线所示位置的均匀数据矩阵,即  $k_x - k_x$  域内数据均匀分布,使之消除方位向和距离向的耦合<sup>[8]</sup>。

实际操作中,若在  $k_x - k_x$  域直接插值,则相当于把不等间隔数据插成等间隔数据,难度较大;故需根据待插值数据在  $k_x - k_x$  域矩阵中的位置所对应的  $k$  值计算得到相应  $k_x$  值,然后在  $k_x - k$  域矩阵中进行插值。这种做法相当于把等间隔数据插成不等间隔数据,操作比较方便。在  $k_x - k$  域中原始数据及待插数据如图5所示<sup>[9]</sup>。

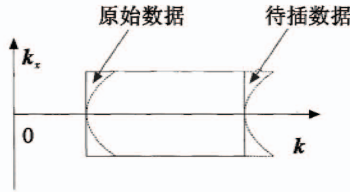


图5  $k_x - k$  域中原始数据及待插数据分布情况

Fig. 5 Raw data in the  $k_x - k$  domain and the distribution of data to be inserted

下面对本文中使用的的基础算法——细胞元插值算法<sup>[7]</sup>进行介绍。

对于任意给定的  $k_x$ , 插值算式为

$$F'(k_x, K_n) = \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} \sum_{n=N_1}^{N_2} F(k_x, k_n) \quad (6)$$

式中:  $F'(k_x, K_n)$  为要插得的第  $n$  个单元的值;  $F(k_x, k_n)$  ( $i = N_1, N_1 + 1, \dots, N_2$ ) 是沿波数  $k$  方向分布且落在要插值单元的数据,这些数据对单元值都有贡献,故取这些数据的平均值作为单元值。若要插值单元没有  $F(k_x, k_n)$  落在其中,则将此单元格的值设为0。图6为插值示意图。

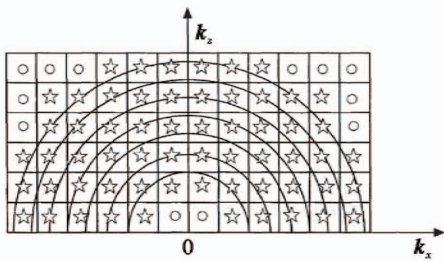


图6 细胞元插值法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cellular interpolation

如图6所示,矩阵网格即待插值单元。对于任一  $k_x$ , 沿  $k$  方向落在每个网格单元的所有  $F(k_x, k_n)$  的平均值作为该网格单元的值,没有  $F(k_x, k_n)$  落在网格内,网格单元值即视为0。

由于该插值方法得到的网格单元值是多个数据作用的结果,因此与传统几何插值方法相比,插值精度会有较大幅度的提高,且算法运算时间较短,成像速度有一定的提高。

本文提出基于传统细胞元插值法的优化算法,传统细胞元插值法是通过求平均值进行插值,而该优化

算法取的是加权平均值进行插值。在划分细胞元时每个单元内数据分布并不均匀,所以按照数据的贡献度求得加权平均值进行插值。

假设当前待插单元格  $F(k_x, K_n)$  有  $M$  个数据,数值分别为  $F(k_x, k_i)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ , 每个数据离中心距离为  $m_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ , 那么贡献度为

$$E_i = \frac{m_i}{\sum_{i=0}^M m_i} \quad (7)$$

则数值  $F(k_x, k_i)$  为

$$F(k_x, K_n) = \sum_{i=0}^M F(k_x, k_i) E_i \quad (8)$$

因为数据的贡献值可以在回波采样前就进行计算,所以与传统的细胞元插值法相比,该优化算法并不会增加计算的复杂度,同时还可以提高成像质量。

### 3 横断面仿真结果

通过在以下实验条件下,对上述算法进行仿真实验,对算法有效性进行论证。在 Matlab 仿真软件中进行仿真实验。给出的目标、频率等预设为:中心频率  $f = 30$  GHz, 天线步进长度  $\Delta d = 5$  mm, 扫描长度  $L = 2$  m, 目标分别在  $(-0.1, 0.2)$ ,  $(0, 0.2)$ ,  $(0.1, 0.2)$ ,  $(0, 0.1)$ ,  $(0, 0)$ ,  $(0, -0.1)$ ,  $(-0.1, -0.2)$ ,  $(0, -0.2)$  和  $(0.1, -0.2)$  (单位, m) 的位置处放置了散射强度为1的小球,摆放成 I 字形,设置目标示意图,如图7所示。

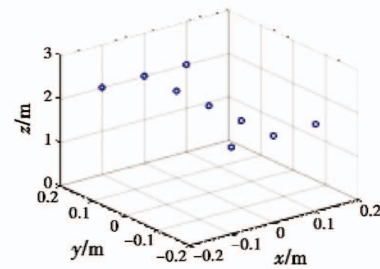


图7 目标点放置示意图

Fig. 7 Target point setting

图8给出了仅做了波数域相位补偿的二维横断面像。

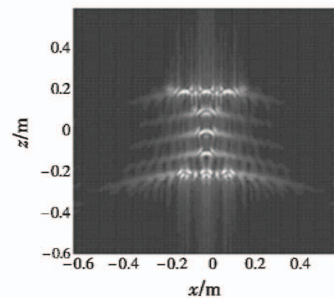


图8 波数域相位补偿二维横断面像

Fig. 8 Wavenumber-domain phase-compensated two-dimensional cross-sectional image



由图 8 可以得出,在图 7 中放置小球的位置是能够显示出目标像素点的,但是不够清晰,这是由于各个小球目标处的像素点波瓣过宽,同时每一个像之间又存在像的混叠,不能明确区分各个目标点处所成的像。所以,如果仅仅做基础的波数域相位补偿,成像的质量差,无法有效识别目标点的位置。因此引入 Stolt 细胞元插值算法,引入 Stolt 插值算法后仿真如图 9 所示。

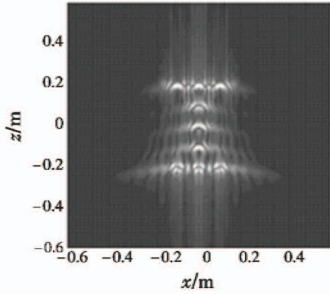


图 9 基于 Stolt 细胞元插值二维横断面像

Fig. 9 Interpolation of two-dimensional cross-sectional image based on Stolt cell element

从图 9 中可以发现,经过 Stolt 细胞元插值算法处理之后,与图 8 相比,各个像素点发散的情况得到抑制,成像质量得到显著提升,本文所提问题也得到一定程度的解决,为了追求更好的成像质量,再使用基于 Stolt 插值的优化算法进行仿真处理。仿真结果如图 10 所示。

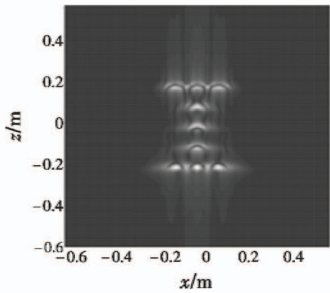


图 10 使用优化算法二维横断面像

Fig. 10 2D cross-sectional image using optimization algorithm

经优化算法处理之后,各个像点进一步收敛,能量更加集中。图 10 和图 9 相比成像质量也有了进一步的提升,说明经过优化算法处理之后成像效果图可以将相邻目标点进行区分,字母 I 形状更为清晰。

表 1 3 种不同算法对 (0.1,0.2) 处目标像的成像效果  
Table 1 Imaging effects of three different algorithms on the target image at (0.1,0.2)

| 算法分类   | 成像位置/m            | X 向误差/% | Y 向误差/% |
|--------|-------------------|---------|---------|
| 直接相位补偿 | (0.096 2,0.197 2) | 0.38    | 0.28    |
| 细胞元插值法 | (0.101 5,0.198 8) | 0.15    | 0.12    |
| 优化算法   | (0.100 8,0.200 7) | 0.08    | 0.07    |

表 1 以在(0.1,0.2) (单位,m)处的小球为例,比较 3 种算法在仿真实验中处理结果的精度。表 1 表明了优化算法对成像效果优化的有效性。

### 4 结论

本文在毫米波全息成像算法的基础上讨论了目标二维横断面像,针对基础算法仿真结果中像素点收敛度不高等问题,使用 Stolt 插值算法与基于 Stolt 差值算法的优化算法提高成像质量。仿真实验结果证明了毫米波全息成像基础算法能够实现目标成像,优化算法能够进一步提高成像精度。下一步将开展对目标三维像的成像算法以及数据处理手段的研究。

### 参考文献

- [1] LI X, LI S Y, ZHAO G Q, et al. Multi-polarized millimeter-wave imaging for concealed weapon detection [ C ]// IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Beijing, 2016: 892-894.
- [2] LEE D J, KIM S, SONG D R, et al. Photonic-assisted on-wafer millimeter-wave imaging system [ C ]//The 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Copenhagen, 2016:1-2.
- [3] ZHU L, LI X G, WANG B Q. The research on short-range target holographic imaging algorithm [ J ]. Progress in Electromagnetics Research M, 2013, 33 :251-262.
- [4] 毛茅,李玉书. 毫米波宽带成像测量雷达及其关键技术研究 [ J ]. 飞行器测控学报, 2015 ( 1 ):42-47.
- [5] KAN Y Z, ZHU Y F, FU Q. A direct integral imaging method for near-field 3-D imaging [ C ]//Progress in Electromagnetic Research Symposium, Shanghai, 2016: 2838-2842.
- [6] LAO B Q, WANG J Y, WANG J Q, et al. Two-dimensional short-range microwave holography algorithm and convolutional gridding [ C ]//The 10th International Conference on Natural Computation, Xiamen, 2014:974-979.
- [7] 张麟兮,李南京,胡楚锋,等. 雷达目标散射特性测试与成像诊断 [ M ]. 北京:中国宇航出版社, 2009.
- [8] 史耀亮. 毫米波雷达近程平面扫描散射成像算法研究 [ D ]. 南京:南京理工大学, 2015.
- [9] 朱莉,李兴国,王本庆. 近程目标毫米波全息成像算法及仿真 [ J ]. 电光与控制, 2011, 18 ( 6 ):37-40.