

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2021.01.013

基于 FGG NUFFT 的穿墙成像雷达快速 BP 算法

李家强^{1,2}, 陈焱博², 徐才秀³, 陈金立^{1,2}, 刘然², 朱艳萍²

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044;

2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏南京 210044;

3. 江苏北斗卫星导航检测中心有限公司, 江苏南京 210032)

摘要: 针对穿墙成像雷达后向投影(Back Projection, BP)算法存在计算复杂度较高、内存需求较大等问题, 本文提出了一种基于快速高斯网格化的非均匀快速傅里叶变换(Fast Gaussian Gridding Nonuniform Fast Fourier Transform, FGG NUFFT)成像算法, 该算法能够有效加速BP算法。对经过联合熵值法抑制墙体杂波后得到的目标回波数据, 首先将BP算法中像素点幅值与高斯核函数反卷积消除高斯平滑的影响, 然后对均匀数据进行快速傅里叶变换, 最后对得到的数据进行卷积运算实现对数据均匀平滑输出。该方法预先划分网格并存储系数, 避免了重复运算。通过对基于时域有限差分法(Finite Different-Time Domain, FDTD)的仿真软件 GprMax2D/3D 所获得的穿墙雷达数据进行处理, 仿真实验证明该方法在保证成像质量的情况下, 有效降低计算复杂度与内存需求。

关键词: 穿墙雷达; 杂波抑制; BP 算法; 非均匀快速傅里叶变换; 快速高斯网格化

中图分类号: TN957.51 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2021)01-0079-07

Fast BP Algorithm Based on FGG NUFFT for Through-Wall Imaging Radar

LI Jiaqiang^{1,2}, CHEN Yanbo², XU Caixiu³, CHEN Jinli^{1,2}, LIU Ran², ZHU Yanping²

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Beidou Satellite Navigation Testing Center Corporation, Ltd, Nanjing 210032, China)

Abstract: Aim to the problems of high computational complexity and large memory requirement for the back projection (BP) algorithm of through-wall imaging radar, a fast Gaussian gridding nonuniform fast Fourier transform is proposed to accelerate the calculation process of BP algorithm. Using the combination entropy method to suppress clutter from the wall, the influence of Gaussian smoothing is firstly eliminated by deconvolution between the BP algorithm of pixel amplitude and Gaussian kernel function. Then fast Fourier transform is applied to the uniform data. Finally the smooth output data are obtained by convolution operation. The proposed method divides the grid and stores the coefficients in advance to avoid repeated operation. Through processing the through-wall-radar data obtained by GprMax2D/3D, a simulation software based on FDTD, the simulation experiment proves that this method can effectively reduce the computational complexity and memory requirement under the condition of ensuring the imaging quality.

Key words: through-wall imaging radar; clutter suppression; BP algorithm; nonuniform fast Fourier transform; fast Gauss gridding

0 引言

穿墙成像雷达(Through-Wall Imaging Radar, TWIR)利用电磁波良好的穿透特性, 能够对建筑

物、堡垒、草丛等隐蔽物后目标进行探测, 其硬件成本低、质量轻、体积小、便携性好, 并且能够进行实时目标定位、分类与识别, 因此被广泛用于军用与民用领域, 诸如执法行动、反恐斗争、刑事侦查、抢险救援等^[1-5]。

收稿日期: 2020-07-07; 修回日期: 2020-09-04

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程二期项目(电子信息工程)资助; 国家自然科学基金(No. 61801231); 江苏省自然科学基金(No. BK20191399)

穿墙雷达常用的成像方法有压缩感知(Compression Perception, CS)成像算法^[6]、逆散射层析(Diffraction Tomography, DT)算法^[7]、边界估计(Shape Estimation Algorithm Based on BST and Extraction of Directly Scattered, SEABED)算法^[8]、后向投影(Back Projection, BP)算法^[9]等。CS 成像对稀疏或可压缩的回波信号,通过求解带约束的 l_1 范数最优化问题,利用远低于 Nyquist 采样定理所需采样数重构原始回波信号成像,虽然 CS 成像应用前景广阔,但仍存在加性噪声和模型误差干扰求解过程以及图像结果等问题。DT 算法能够对成像场景的图像准确重构,但其需要多次迭代运算,计算量巨大,在工程上难以应用。利用目标边界形状与接收脉冲延时之间存在逆边界散射变化的 SEABED 算法,可以对目标边界进行清晰成像,但存在障碍物时电磁波的传播路径和时延会发生变化,该算法不再满足逆边界散射变换,从而不能对目标进行精确成像。近年来,BP 算法通过将雷达回波数据投影到成像区域的各个像素点,计算雷达回波在雷达天线和图像像素之间距离的时延,在时域上进行相干累加来实现高分辨率成像。由于 BP 算法计算过程简单易于工程实现,且能精确补偿墙体对信号产生的影响,因此被广泛应用于穿墙成像雷达中,但该算法运算数据量较大,存在冗余现象,从而导致计算复杂度较高,并且对计算机内存需求大,为此,国内外学者提出了一些相关加速 BP 算法的方法。文献[10]提出了一种快速因子分解后向投影算法,该方法将子孔径信号投影到局部极坐标下的成像网格上,通过距离维数的偏移和角度维数的旋转来校正得到粗糙的子图像,再将子图像进行融合得到最后的成像图,随后 Moon 等人提出了一种新的分解 BP 成像方法^[11],该方法把图像分割成单独处理的列,将子图像连贯地相加。该算法容易实现并行化,由于每一列都可以独立于其他列形成,因此能够降低计算复杂度。以上方法都是通过分割子图像后进行融合,虽然在计算复杂度上有所降低,但同时也降低了成像精度。文献[12]提出了一种迭代子图像的 BP 成像算法,该方法迭代子图像进行图像重构降低复杂度,但不适用于大规模的雷达成像。文献[13]提出了一种快速 BP 算法,其原理是将成像区域分块划分,通过分级相干累

加的方式减小 BP 算法的运算量,该算法虽然有效降低了一定的运算量,但是难以满足现阶段实时成像的需求。基于非均匀快速傅里叶变换的 BP 成像算法^[14]利用 BP 算法中像素点幅值表达式满足非均匀傅里叶变换表达式,采用快速傅里叶变换进行计算,降低计算复杂度且保证成像质量,适用于大规模实时成像,但该算法需要重复计算幅值表达式中的系数,对计算机内存需求大。

针对上述问题,本文提出了一种基于快速高斯网格化的非均匀的快速傅里叶变换加速 BP 算法。该算法将 BP 算法中像素点幅值表达式与高斯核函数反卷积消除高斯平滑的影响,其次对均匀数据进行快速傅里叶变换,最后对得到的数据进行卷积运算平滑输出数据。仿真结果表明,所提算法能够避免重复计算和存储 BP 算法中像素点幅值表达式中的系数,从而快速计算像素点幅值矩阵,并且在不改变成像质量的同时,大大降低计算复杂度和内存需求,适用于大规模成像和实时处理。

1 穿墙雷达成像模型

穿墙成像雷达模型如图 1 所示:前墙与后墙的墙体厚度为 d ,相对介电常数为 ϵ_w ,探测目标为半径 r 的理想电导体,置于两面墙之间,圆心与前墙的垂直距离为 δ 。设置平行于前墙体的两组间距极小的收发共置天线,其距离墙体分别为 h_1 和 h_2 ,两组天线分别先后发射电磁波。电磁波首先

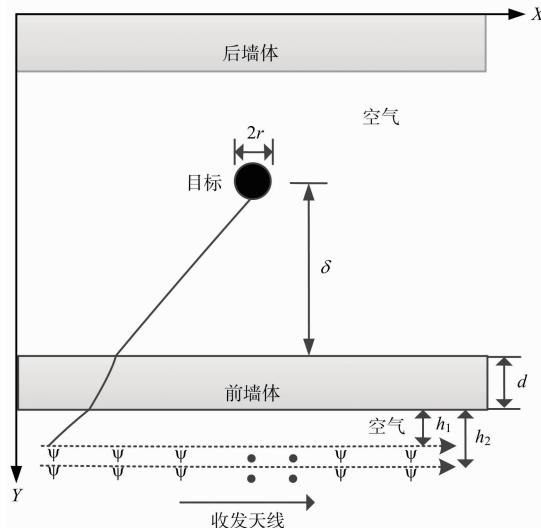


图 1 穿墙雷达探测场景模型

穿透前墙体, 经过墙体另一侧空气传播, 到达目标物体后按原路散射回天线, 两组天线具有相同的回波信号模型:

$$e(t) = e_t(t) + e_w(t) + e_a(t) \quad (1)$$

式中, $e_t(t)$ 为所需探测的目标信号, $e_w(t)$ 为前墙体与后墙体的反射信号, 假定天线为理想天线, 那么噪声信号 $e_a(t) = 0$ 。

2 基于 FGG NUFFT 的穿墙雷达快速 BP 成像

穿墙雷达探测过程中受墙体引起的强烈杂波信号干扰, 往往目标信号会被淹没, 无法进行目标检测及成像, 因此成像之前必须通过算法消除墙体杂波信号的影响。

2.1 联合熵值法抑制墙体杂波

本文采用两组天线阵元分别平行于墙体进行全向扫描得到两组回波信号。对 N 个天线阵元回波信号分别进行采样, 记采样次数为 M , 两组回波信号数据分别可组成 $M \times N$ 维矩阵 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$:

$$\mathbf{e}_1 = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N] \quad (2)$$

$$\mathbf{e}_2 = [\mathbf{y}_1^*, \mathbf{y}_2^*, \dots, \mathbf{y}_N^*] \quad (3)$$

式中, $\mathbf{y}_n = [y_n(1), y_n(2), \dots, y_n(M)]^\top$, $\mathbf{y}_n^* = [y_n^*(1), y_n^*(2), \dots, y_n^*(M)]^\top$, $n = 1, 2, \dots, N$, $y_n(m), y_n^*(m), m = 1, 2, \dots, M$ 分别表示同一天线阵元在不同采样点接收的回波信号幅值。

将式(2)与式(3)相加, 能够得到

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 = [\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_N] \quad (4)$$

$\mathbf{z}_n = [z_n(1), z_n(2), \dots, z_n(M)]^\top$, 式中 $z_n(m) = y_n(m) + y_n^*(m)$ 表示两组天线阵元在同一采样点接收的回波信号幅值之和。

计算矩阵 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ 中每个采样点值的概率:

$$q_n(m) = \frac{y_n^2(m)}{\sum_{k=0}^{N-1} y_k^2(m)} \quad n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$q_n^*(m) = \frac{y_n^{*2}(m)}{\sum_{k=0}^{N-1} y_k^{*2}(m)} \quad n = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

式中, $q_n(m)$ 表示矩阵 \mathbf{e}_1 中每个采样点值 $y_n(m)$ 所对应的概率, $q_n^*(m)$ 表示矩阵 \mathbf{e}_2 中每个采样点

值 $y_n^*(m)$ 所对应的概率, 且 $\sum_{n=1}^N q_n(m) = 1$, $\sum_{n=1}^N q_n^*(m) = 1$ 。将 y_n, y_n^* 作为信源, 分别计算两者对应熵值 H_n, H_n^* :

$$H_n = -\sum_{m=1}^M q_n(m) \log(q_n(m)) \quad (7)$$

$$H_n^* = -\sum_{m=1}^M q_n^*(m) \log(q_n^*(m)) \quad (8)$$

根据联合熵值定理^[15], 统计独立信源的联合熵值等于各信源熵之和, 这里两组回波信号前后分别获得, 可以视作相互独立, 因此两者的联合熵值表示如下:

$$H = H_n + H_n^* \quad (9)$$

由于天线阵元不同扫描位置的变化, 目标回波信号的变化强度较大, 而墙体杂波的变化强度较小, 因此目标回波信号熵值较小, 墙体杂波熵值较大^[16]。根据联合熵值定理^[15], 统计独立信源的联合熵值等于它们分别熵值之和, 且大于其任何一个信源的熵值, 即墙体杂波的联合熵值大于目标回波的联合熵值, 可通过设置适当的门限值 Z^* 能够滤除墙体杂波的影响, 对回波数据 \mathbf{e} 中每个元素进行处理:

$$Z_n(m) = Z^* \cdot z_n(m) \quad (10)$$

式中, $Z_n(m)$ 为去除墙体杂波后所需的目标回波信号, 而 Z^* 定义为

$$Z^* = \begin{cases} 0, & H \geqslant \beta \log(N) \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\log(N)$ 为联合熵值 H 的最大值, β 为门限可调节因子, 其调节范围为 $(0, 2)$ 。根据最大离散熵值定理^[15], 在离散信源等概率出现的情况下, 信源的平均不确定性为最大, 熵值将达到最大, 即联合熵值取得最大值。

2.2 基于 FGG NUFFT 的快速 BP 成像

图 2 为穿墙雷达成像区域像素点网格化分, 将整个探测场景划分为 P 个像素网格点, l_1, l_2, l_3 分别表示发射电磁波天线阵元与前墙体的斜距、电磁波在墙体传播的距离以及电磁波穿过墙体后到达目标的距离, 则穿墙雷达 BP 成像可表示为

$$I(x_p, y_p) = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} Z_n(m) e^{j2\pi f_m \tau_p} \quad (12)$$

式中, $I(x_p, y_p)$ 为第 p ($p = 1, 2, \dots, P-1$) 个像素网格点的复幅度值, $f_m = f_0 + m \Delta f$ 为第 m ($m = 1, 2, \dots, M$) 个采样点的复幅度值, τ_p 为第 p 个像素网格点的传播时间, Δf 为采样间隔。

$1, 2, \dots, M$)个工作频点, f_0 为发射信号的起始频率, Δf 为频率间隔, τ_p 为成像像素网格点 p 和第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 根天线之间的双程时延:

$$\tau_p = 2(l_1 + l_3)/c + 2l_2/v \quad (13)$$

式中, $v=c/\sqrt{\epsilon_w}$ 为电磁波在墙体的传播速度, c 为电磁波在空气中的传播速度, ϵ_w 为墙体的相对介电常数。

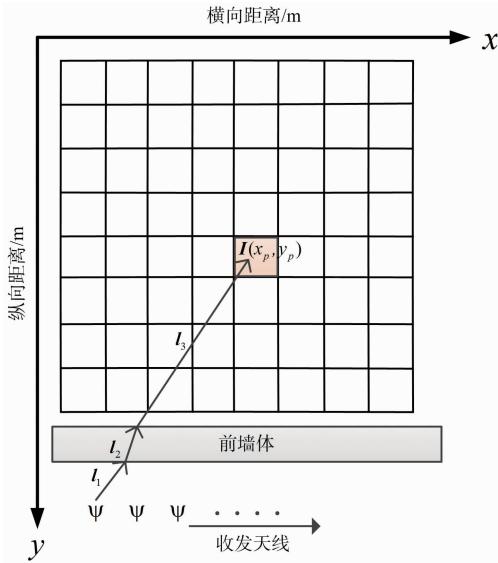


图 2 成像区域像素点网格

NUFFT 能够直接对非均匀数据进行快速处理, 即可将均匀采样数据变换到非均匀采样数据^[17]。对于均匀采样序列 $F(k) \in \mathbb{C}, k=0, 1, \dots, K-1, K \in \mathbb{N}$, 则非均匀采样序列的离散傅里叶变换定义为

$$f(x_j) = \sum_{k=0}^{K-1} F(k) e^{ikx_j} \quad (14)$$

式中 $x_j \in [0, 2\pi]$ 。 $g_\tau(x)$ 是 $[0, 2\pi]$ 上的一维周期高斯核函数, 其表达式如下:

$$g_\tau(x) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} e^{-(x-2l\pi)^2/4\tau} \quad (15)$$

式中, τ 为高斯核函数参数, 决定高斯核函数的指数衰减速率。

对高斯核函数 $g_\tau(x)$ 进行傅里叶变换得到 $G_\tau(k)$, 令 $G_\tau(k)$ 与均匀数据 $F(k)$ 反卷积消除高斯平滑的影响, 得到辅助函数 $F_{-\tau}(k)$:

$$F_{-\tau}(k) = F(k)/G_\tau(k) = \sqrt{\pi/\tau} e^{k^2\tau} F(k) \quad (16)$$

进一步对式(16)进行离散傅里叶反变换得到 $f_{-\tau}(x)$:

$$f_{-\tau}(x) = \sum_{k=0}^{K-1} F_{-\tau}(k) e^{ikx} \quad (17)$$

式中, $K_r = R \times K$, K_r 为过采样网格数, R 为过采样系数。由于 $f_{-\tau}(x)$ 满足均匀性, 分布在均匀的网格点上, 因此, 可以用快速傅里叶变换对其进行计算。

对 $f_{-\tau}(x)$ 进行卷积实现平滑输出, 得到期望值 $f(x_j)$:

$$\begin{aligned} f(x_j) &= f_{-\tau} * g_\tau(x_j) = \\ &\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_{-\tau}(x) g_\tau(x_j - x) dx \approx \\ &\frac{1}{K_r} \sum_{\sigma=0}^{K_r-1} f_{-\tau}(2\pi\sigma/K_r) g_\tau(x_j - 2\pi\sigma/K_r) \end{aligned} \quad (18)$$

在求解式(18)时, 每次计算非均匀采样点 x_j 时都要遍历所有的均匀网格点, 因此计算量巨大, 由于高斯函数的指数衰减特性, 对远离 x_j 的网格点忽略不计, 因此可设置网格扩散范围, 仅考虑 x_j 附近的 K_{sp} 个点, K_{sp} 为高斯核函数单边可延伸覆盖的网格点数量 ($K_{sp}=6$ 表示单精度, $K_{sp}=12$ 表示双精度)。

式(18)中 $f_{-\tau}, g_\tau$ 可表示为

$$f_{-\tau}(2\pi\sigma/K_r) = \sum_{k=0}^{K_r-1} \sqrt{\pi/\tau} e^{k^2\tau} F(k) e^{ik2\pi\sigma/K_r} \quad (19)$$

$$g_\tau(x_j - 2\pi\sigma/K_r) = e^{-x_j^2/4\tau} (e^{x_j\pi/K_r\tau})^\sigma e^{-(\pi\sigma/K_r)^2/\tau} \quad (20)$$

式(19)、式(20)中, $e^{-x_j^2/4\tau}$ 和 $e^{x_j\pi/K_r\tau}$ 中都含有 x_j , 而 $\sqrt{\pi/\tau} e^{k^2\tau}, e^{ik2\pi\sigma/K_r}, e^{-(\pi\sigma/K_r)^2/\tau}$ 与 x_j 无关。因此, 对于非均匀采样点 x_j , 仅需计算和存储两个指数 $e^{-x_j^2/4\tau}$ 和 $e^{x_j\pi/K_r\tau}$, 而 $\sqrt{\pi/\tau} e^{k^2\tau}, e^{ik2\pi\sigma/K_r}, e^{-(\pi\sigma/K_r)^2/\tau}$ 在整个计算过程中就只计算一次, 避免了重复计算, 减少了存储空间。设 $\zeta = 2\pi\sigma/K_r$ ($\zeta \leq x_j$), ξ 表示在离 x_j 极近的均匀网格点。计算存储指数 $E = \sqrt{\pi/\tau} e^{k^2\tau}$, $E_1 = e^{ik\zeta}$, $E_2 = e^{-(x_j - \zeta)^2/4\tau}$, $E_3 = e^{-(x_j - \zeta)\pi/K_r\tau}$, $E_4 = e^{-(\pi\zeta/K_r)^2/\tau}$, 则期望值 $f(x_j)$ 可表示为

$$f(x_j) = \frac{1}{K_r} \sum_{\sigma=0}^{K_r-1} F(k) \cdot E \cdot E_1(\sigma') \cdot E_2 \cdot E_3(\sigma') \cdot E_4 \quad (21)$$

式中, $-K_{sp} < \sigma' < K_{sp}$ 。

由于目标回波数据 $Z_n(m)$ 是均匀数据, 时延 τ_p 对于单个像素点的幅值 $I(x_p, y_p)$ 是非均匀的, 无法直接用快速傅里叶变换进行计算, 而本文所

提 FGG NUFFT 算法适应非均匀性,能够对非均匀数据进行快速傅里叶变换。该算法的主要思想就是将均匀样本与高斯函数反卷积消除高斯平滑的影响,其次进行快速傅里叶变换,最后将样本卷积高斯函数实现平滑输出。因此,运用 FGG NUFFT 算法对像素点的幅值 $I(x_p, y_p)$ 进行快速计算。

式(12)中 BP 成像算法可变形为

$$I(x_p, y_p) = \frac{1}{MN} \sum_{n=0}^{N-1} I_n(x_p, y_p) \quad (22)$$

其中,

$$\begin{aligned} I_n(x_p, y_p) &= \sum_{m=0}^{M-1} Z_n(m) e^{j2\pi f_m \tau_p} = \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} Z_n(m) e^{j2\pi(f_0 + m\Delta f)\tau_p} = \\ &= e^{j2\pi f_0 \tau_p} \sum_{m=0}^{M-1} Z_n(m) e^{j2\pi m \Delta f \tau_p} \quad (23) \end{aligned}$$

式(23)能够通过 FGG NUFFT 来计算,式中每个像素点的幅值 $I_n(x_p, y_p)$ 对应式(14)中的非均匀采样点 $f(x_j)$,均匀目标回波数据 $Z_n(m)$ 对应式(14)中的均匀采样点 $F(k)$,频率间隔与双程时延的乘积 $2\pi\Delta f\tau_p$ 对应式(14)中的非均匀数据 x_j 。

3 实验结果与分析

为了验证所提算法的有效性,本文利用基于 FDTD 的正演数值模拟软件 GprMax2D/3D 模拟穿墙雷达场景。模型设置如图 1 所示:天线阵元距离墙体分别为 $h_1 = 0.05$ m, $h_2 = 0.04$ m;沿水平方向等间距扫描 $N = 50$ 次,扫描范围为 $0.1 \sim 2.1$ m;天线发射电磁波的时间窗为 24 ns。墙体为均匀介质,其厚度 $d = 0.2$ m,相对介电常数 $\epsilon_w = 6.4$;理想电导体目标的半径 $r = 0.1$ m,其圆心距离墙体 $\delta = 1.0$ m。图 3 为经过联合熵值抑制墙体杂波后得到的目标时域回波图。

3.1 穿墙雷达探测场景成像

分别运用 BP 成像算法,NUFFT BP 成像算法^[17]和本文所提算法对穿墙雷达探测区域进行成像。选取电磁波频段范围为 $1 \sim 2$ GHz,频率间隔 $\Delta f = 0.49$ MHz,频率点 $M = 2036$ 。成像区域设置横向距离 2.2 m,纵向距离 2.1 m,按照横向的和纵向划分 279×293 个像素点。图 4 为 3 种算法的

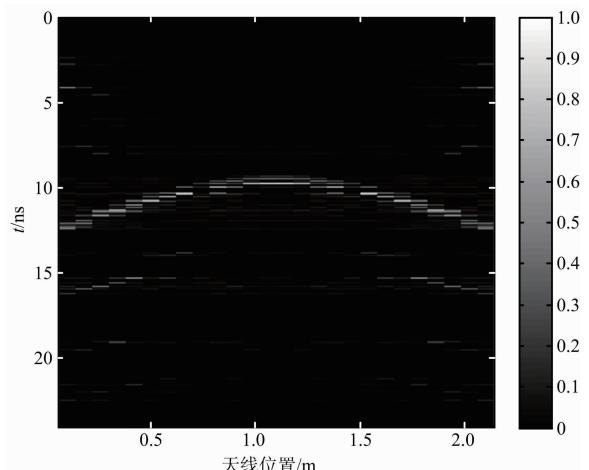
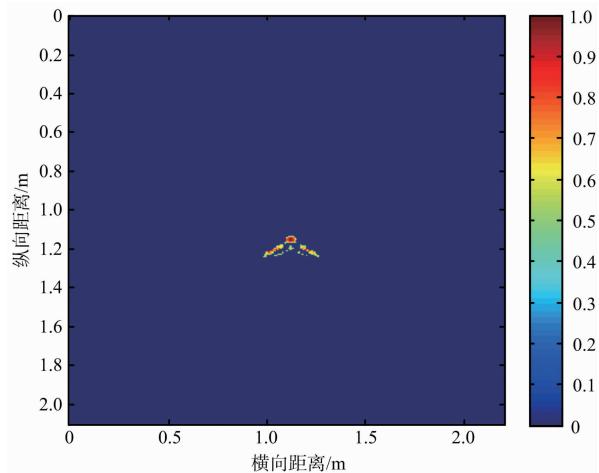
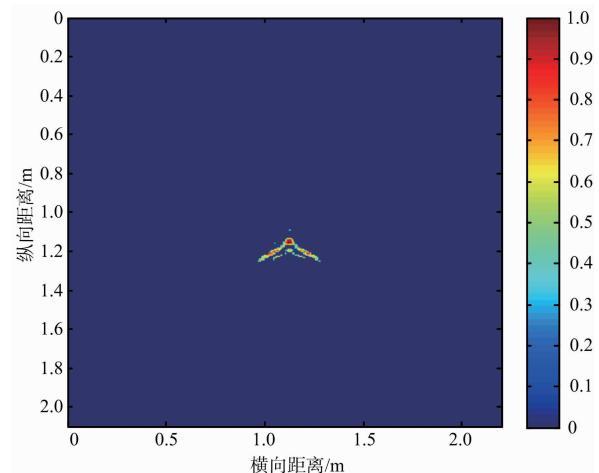


图 3 目标时域回波图

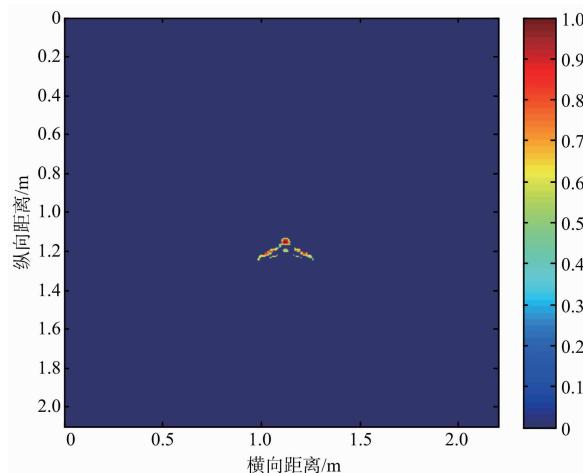
成像结果,其中图 4(a)为基于 BP 算法成像、图 4(b)为基于 NUFFT BP 算法成像、图 4(c)为基于 FGG NUFFT BP 算法成像。为了比较 3 种算法的成像分辨率,对像素点矩阵进行归一化幅值,图 5 为 3 种算法的成像像素点归一化幅值曲线图。



(a) 基于 BP 算法成像



(b) 基于 NUFFT BP 算法成像



(c) 基于 FGG NUFFT BP 算法成像

图 4 3 种算法成像结果

取成像最大幅值下降 -3 dB 处的像素点宽度, BP 成像为 3.8 个像素点, NUFFT BP 成像为 5.3 个像素点, 本文算法成像为 4.9 个像素点, 3 种算法的宽度相差较小, 均能对目标区域进行精确成像, 且本文算法保持较好效果的同时优于 NUFFT BP 成像。

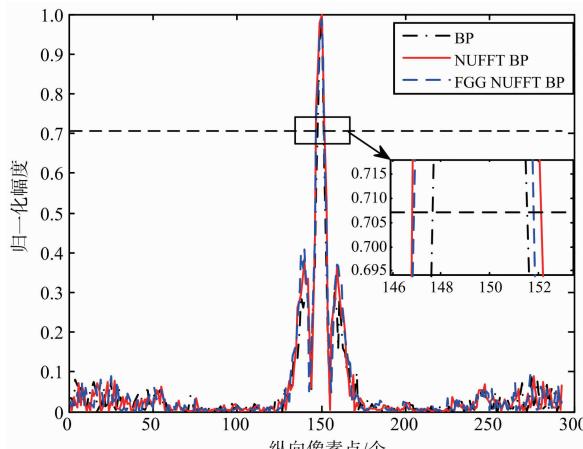


图 5 成像点归一化幅值

3.2 计算复杂度分析

分别对 BP 成像、NUFFT BP 成像和本文提出算法成像的计算复杂度进行简要的分析。假设忽略天线根数的影响, 取 $N=1$, 由于天线的采样点远远小于像素点个数, 即 $M \ll P$ 。BP 算法的计算复杂度为 $C_0 = MP$, NUFFT BP 的计算复杂度为 $C_1 = M \log M + |\log \epsilon| P \approx |\log \epsilon| P$, 其中 ϵ 为理想计算精度^[18-19]。本文设置高斯核函数单边可延伸覆盖 6 个网格点, 即运算精度 $K_{sp} = 6$; 过采样系数 $R = 2$, 取值细节见文献[20]。本文所

提的算法中 E, E_1, E_2, E_3, E_4 能预先被计算和存储, 不需要重复计算, 因此本文算法的计算复杂度为 $C_2 = (K_{sp} + 1)M + (K_r \log K_r) + P \approx P$ 。图 6 为 3 种算法的计算复杂度与像素点网格点变化的曲线图, 通过比较可以发现在同等条件下, 对于同样的像素点本文算法计算复杂度要远低于其他两种算法计算复杂度, 各类算法复杂度见表 1。

表 1 各类算法的计算复杂度比较

算法	计算复杂度
BP 成像	$C_0 = MP$
NUFFT BP 成像	$C_1 = M \log M + \log \epsilon P \approx \log \epsilon P$
FGG NUFFT BP 成像	$C_2 = (K_{sp} + 1)M + (K_r \log K_r) + P \approx P$

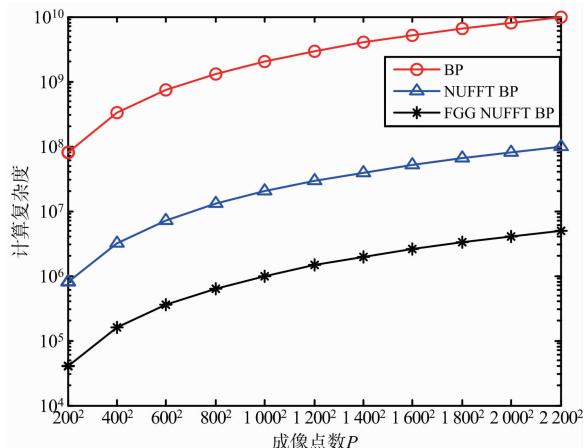


图 6 计算复杂度

3.3 存储需求

分别对 BP 成像、NUFFT BP 成像和本文提出算法成像的内存需求进行简要的分析。实部和虚部都用浮点数表示, 每个实部的内存需求为 4 Byte, 每个虚部的内存需求为 8 Byte。BP 的像素点幅值矩阵 $I \in \mathbb{C}^{M \times P}$, 因此直接计算 BP 成像的内存需求为 $S_0 = 8MP$ 。NUFFT BP 成像的内存需求为 $S_1 = 8(M \log M + |\log \epsilon| P) \approx 8|\log \epsilon| P$ 。本文算法成像只需要存储系数 $E \in \mathbb{R}^P, E_1 \in \mathbb{C}^{2K_{sp} \times M}, E_2 \in \mathbb{R}^{2K_{sp} \times P}, E_3 \in \mathbb{R}^{2K_{sp} \times P}, E_4 \in \mathbb{C}^{2K_{sp}}$, 则 $S_2 = 4P(1 + 4K_{sp}) + 8K_{sp}(1 + 2M) \approx 100P$ 。图 7 为 3 种算法的内存需求与像素点网格点变化的曲线图, 通过比较可以发现在同等条件下, 对于同样的像素点本文算法内存需求要低于其他两种算法内存需求, 各类算法内存需求见表 2。

表 2 各类算法的内存需求比较

算法	内存需求
BP 成像	$S_0 = 8MP$
NUFFT BP 成像	$S_1 = 8(M \log M + \log_e P) \approx 8 \log_e P$
FGG NUFFT BP 成像	$S_2 = 4P(1+4K_{sp}) + 8K_{sp}(1+2M) \approx 100P$

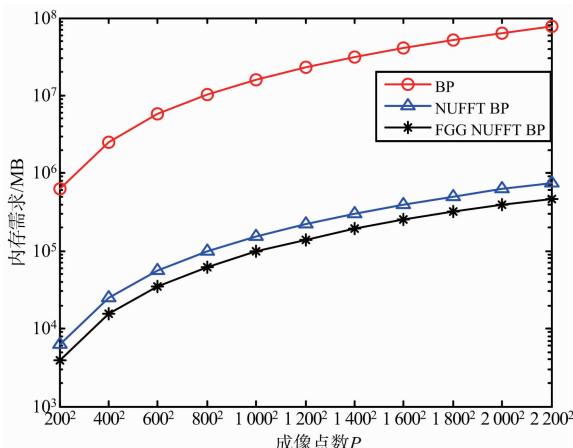


图 7 内存需求比较

4 结束语

传统的 BP 成像算法需要计算每个回波数据与图像像素之间双程并进行相干累加,因此存在计算复杂度高,内存需求量巨大,需要重复计算等问题。本文在对墙体杂波进行联合熵值法抑制的基础上,将 FGG NUFFT 算法运用到传统的 BP 成像中,首先将 BP 算法中像素点幅值表达式与高斯核函数反卷积消除高斯平滑的影响,其次对均匀数据进行快速傅里叶变换,最后对得到的数据进行卷积运算实现对数据均匀平滑输出。仿真实验结果表明,本文的方法在保证成像质量的情况下,解决了计算复杂度和内存需求随着工作频点、天线数量、像素点的增加而增加的问题,为穿墙雷达大规模成像与实时成像提供了新的思路与解决途径。

参考文献:

- [1] BARANOSKI E J. Through-Wall Imaging: Historical Perspective and Future Directions[J]. Journal of the Franklin Institute, 2008, 345(6):556-569.
- [2] AMIN M G. Through-the-Wall Radar Imaging[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.
- [3] GUO Q C, LI Y L, LIANG X D, et al. Through-the-Wall Image Reconstruction via Reweighted Total Variational and Prior Information in Radio Tomographic Imaging[J]. IEEE Access, 2020(8):40057-40066.
- [4] XIA C Y, GAO Y X, YU J. A Novel Approach for Sparse Imaging of Through-Wall Radar[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1237(3):032001.
- [5] ZHENG C, XI X L, SONG Z G. Through-the-Wall Radar Clutter Mitigation Using Stepped-Frequency Signal[J]. Electronics Letters, 2019, 55(1):53-55.
- [6] BI D J, XIE Y L, MA L, et al. Multifrequency Compressed Sensing for 2-D Near-Field Synthetic Aperture Radar Image Reconstruction[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(4):777-791.
- [7] WANG X Y, DALLMANN T, MOCH R, et al. ISAR Tomography for Full-Polarimetric 3-D Radar Cross-Section Measurements[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2019, 67(4):2853-2858.
- [8] 吴世有, 黄琼, 陈洁, 等. 基于超宽带穿墙雷达的目标定位识别算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11):2624-2629.
- [9] RADECKI K, SAMCZYŃSKI P, GROMEK D. Fast Barycentric-Based Back Projection Algorithm for SAR Imaging [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(22):10635-10643.
- [10] ZUO S S, SUN G C, XING M D, et al. A Modified Fast Factorized Back Projection Algorithm for the Spotlight SAR Imaging[C]//2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (AP-SAR), Singapore: IEEE, 2015:756-759.
- [11] MOON K, LONG D G. A New Factorized Backprojection Algorithm for Stripmap Synthetic Aperture Radar[J]. Positioning, 2013, 4(1):42-56.
- [12] KELLY S I, RILLING G, DAVIES M, et al. Iterative Image Formation Using Fast (Re/Back)-Projection for Spotlight-Mode SAR[C]//2011 IEEE Radar Con (RADAR), Kansas City, MO, USA: IEEE, 2011:835-840.
- [13] BOAG A, BRESLER Y, MICHIELSSEN E. A Multilevel Domain Decomposition Algorithm for Fast O(N^2/\log N) Reprojection of Tomographic Images[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(9):1573-1582.
- [14] QU L L, YIN Y Q, SUN Y P, et al. Efficient Back Projection Imaging Approach for Airborne GPR Using NUFFT Technique[C]//2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Hong Kong, China: IEEE, 2016:1-4.

(下转第 98 页)