

相干场成像全相位目标直接重构法

曹蓓 罗秀娟 陈明徕 张羽

All-phase target reconstruction method for coherent field imaging

Cao Bei Luo Xiu-Juan Chen Ming-Lai Zhang Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124205 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于小波与重调和方程的扩散去噪模型的研究

Diffusion denoising model based on the wavelet and biharmonic equation

物理学报.2015, 64(6): 064203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064203>

基于梯度与曲率相结合的图像平滑模型的研究

Image smoothing model based on the combination of the gradient and curvature

物理学报.2015, 64(4): 044201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044201>

基于 Demons 算法改进的图像去噪模型研究

Image denoising model based on the improved Demons algorithm

物理学报.2015, 64(2): 024205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024205>

基于局部约束群稀疏的红外图像超分辨率重建

Infrared image super-resolution via locality-constrained group sparse model

物理学报.2014, 63(4): 044202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.044202>

基于 l_p 范数的压缩感知图像重建算法研究

An algorithm for image reconstruction based on l_p norm

物理学报.2013, 62(17): 174212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.174212>

相干场成像全相位目标直接重构法*

曹蓓† 罗秀娟 陈明徕 张羽

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2014年11月3日收到; 2014年12月18日收到修改稿)

回波信号处理和目标重构算法是相干场成像中的核心数据处理技术, 直接影响系统的成像质量. 基于全相位谱分析理论, 提出一种新的系统融合处理算法, 对接收端回波信号直接提取全相位谱相位及幅值信息实现目标图像重构, 能够有效抑制各种因素带来的频率误差. 经室外实验系统验证, 成像能力大大优于传统重构算法, 重构目标分辨率接近理论极限值.

关键词: 相干场成像, 目标重构, 全相位, 频谱校正

PACS: 42.30.Wb, 43.60.Hj, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.64.124205

1 引言

相干场成像^[1](又称傅里叶望远镜, FT成像)是近年来得到国内外热切关注的一种新型计算成像技术^[2,3]. 由于采用激光主动照明, 并结合了光学合成孔径技术的优势, 相干场成像能够对远距离暗弱目标高分辨成像, 且分辨率易于由拉长基线来提高. 通过在发射端发射多束经频率调制的相干激光照明目标, 在接收端探测由目标返回的回波能量信号进行数据处理及频谱复原后, 即可通过反演计算重构目标图像.

接收端的数据处理技术对整个系统的成像质量有重要影响. 传统的处理方法采用固定频率的解调方式, 得到对应各个空间频率的频谱测量值后消除相位误差实现目标图像重构. 然而由于频率调制系统的误差、大气扰动以及目标运动的影响等因素都会使得实际频率与预设频率产生偏差, 给传统解调后的数据带来很大误差, 导致在实际成像环境中无法重构目标图像. 因此, 针对此问题提出一种适应真实大气环境、对频率误差具有鲁棒性的全新信

号处理方法具有重要意义.

全相位谱分析技术是一种能够显著提高信号处理性能的新方法^[4], 其“相位不变性”能够有效抑制频率误差对相位的影响. 文献^[5]研究了全相位谱分析方法用于FT成像的数值模拟, 文献^[6]基于全相位谱分析技术给出一种FT外场实验数据处理方法, 但是针对相干场成像回波信号解调至目标重构的系统处理方法尚无文献述及. 在此背景下本文提出一种新的系统融合处理算法——全相位目标直接重构法. 该方法无须设定精确频率进行传统解调, 直接对采样长度加倍的回波信号进行全相位谱分析处理, 采用全相位比值法做频谱校正以获得更精确的谱分析结果, 之后直接提取全相位谱主谱线处的相位和幅值信息进行目标图像重构, 实现了从回波信号解调到目标图像重构的全链路处理. 仿真验证全相位法能够有效抑制多种频率误差扰动对相位的影响, 准确提取闭合相位正确重构目标; 将该方法应用于相干场成像室外实验系统中, 在真实大气环境下针对实测数据清晰重构出目标图像, 可辨识细节分辨率近似达到衍射理论极限值.

* 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部博士资助项目”(批准号: Y429621213) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: candy@opt.ac.cn

2 相干场成像回波信号处理原理

相干场成像基于激光干涉主动成像技术^[7,8]. 用多束相干激光同时照射目标, 通过频率调制在发射光束之间引入微小频移, 使干涉条纹移动并扫过目标表面, 接收器接收到目标回波信号后解调并提取拍频处的峰值信息, 即可用以重构图像. 对于三光束成像系统 ($N_l = 3$), 其回波信号可表述为

$$S(\mathbf{K}, t) = cN_l I T O(\mathbf{K} = 0)|_{u,v=0} + cIT \sum_{n=0}^{N_l-1} \sum_{m=n+1}^{N_l-1} O(\mathbf{K}_{nm}) \times \exp[i(\Delta\omega_{mn}(t + T/2) + \phi_{mn})] + \text{c.c.} \quad (1)$$

式中, \mathbf{K} 为发射光束的波矢; c 为比例常数; I 为激光束在目标上的电场强度; T 为采样时间; $O(\mathbf{K}_{nm})$ 为 n, m 两束激光扫描目标形成的空间傅里叶频谱分量; \mathbf{K}_{nm} 对应目标的空间频率坐标 (u, v) ; $\Delta\omega_{mn}$ 为光束 m, n 形成的拍频信号频率, $\Delta\omega_{mn} = \omega_m - \omega_n - \mathbf{K}_{nm} \cdot v$, 其中 ω_m, ω_n 分别为两发射光束的调制频率, v 是目标运动的速度; $\phi_{mn} = \phi_m - \phi_n$ 表示两束激光到达目标的相位差; c.c 为前一项的共轭复数.

由 (1) 式可知: 目标返回的时域能量信号中包含目标的空间傅里叶频谱, 可通过傅里叶逆变换重构目标空域图像 $O(x, y)$:

$$O(x, y) = \iint O(u, v) \cdot \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv. \quad (2)$$

传统解调方法通过给回波信号 $S(\mathbf{K}, t)$ 乘以傅里叶解调因子 $e^{-i\Delta\omega_{mn}t}$ 实现, 在满足 $N_s \Delta\omega_{mn} T_s = 2k\pi, k \in \mathbb{N}$ 的条件下能够实现 3 个不同拍频信号的分离, N_s 代表采样点数, T_s 为单位采样间隔. 三光束系统解调后的频谱测量值如下:

$$\begin{cases} M_{31} = cIT \cdot N_s O(\mathbf{K}_{31}) \\ \quad \times \exp[i(\Delta\omega_{31})t + i(\phi_3 - \phi_1)], \\ M_{32} = cIT \cdot N_s O(\mathbf{K}_{32}) \\ \quad \times \exp[i(\Delta\omega_{32})t + i(\phi_3 - \phi_2)], \\ M_{21} = cIT \cdot N_s O(\mathbf{K}_{21}) \\ \quad \times \exp[i(\Delta\omega_{21})t + i(\phi_2 - \phi_1)]. \end{cases} \quad (3)$$

可知, 在理想无频率误差的情况下, 解调后的频谱值中仅包含该对应拍频对目标调制后的频谱信息,

采用相位闭合技术^[9] 消除大气随机相位误差后即可重构目标图像. 但在实际成像环境中, 由于存在频率调制误差、湍流扰动及目标运动等多种因素, 都会使得到达目标的实际频率出现漂移. 若光束 1 存在频率误差, 将影响其与光束 2, 3 所形成的两个拍频 $\Delta\omega_{21}$ 和 $\Delta\omega_{31}$, 即实际 3 个拍频频率将变为 $\{\Delta\omega_{21} + e, \Delta\omega_{32}, \Delta\omega_{31} + e\}$, e 表示随机误差; 且随着发射光束位置的改变, 即基线配置的不同, 实际频率漂移误差将随机改变, 由此固定频率的解调方式存在很大的误差项, 导致无法重构目标图像. 特别是在对运动目标成像时, 目标的运动速度将会直接影响回波信号的频率.

由相干场成像原理可知, 只要准确复原每个空间频谱分量的幅值及相位信息即能通过傅里叶逆变换反演重构目标图像. 因此, 有必要提出一种对实际成像环境中频率漂移具有鲁棒性的新型目标重构方法.

3 全相位目标直接重构法

3.1 全相位谱分析理论

全相位谱分析是天津大学王兆华教授研究组提出的一种数字信号处理新方法, 能够显著改善传统快速傅里叶变换 (FFT) “截断效应” 带来的信号性能下降. 其理论出发点是: 考虑包含某输入样点的所有长度为 N 的分段. 若信号的原始采样序列为 N 维: $\{x(0), x(1), \dots, x(N-1)\}$, 全相位方法将加长采样长度到 $2N-1$ 维, 即得到采样序列为 $\{x(-N+1), \dots, x(0), \dots, x(N-1)\}$, 可知其中包含了 $x(0)$ 所有可能的 N 个分段, 从而克服了传统 FFT 直接截断带来的信号幅值不连续问题.

全相位预处理是全相位谱分析前重要的数据处理技术^[10], 通过选择长度为 $2N-1$ 维的卷积窗对时域全相位采样序列加权处理后, 叠加间隔为 N 的两段存在延时关系的采样分段得到 N 维全相位输入向量 $y(n) = \{y(0), y(1), \dots, y(N-1)\}$, 再做传统 FFT 即得全相位谱分析结果. 实现框图如图 1 所示.

其中窗函数 w_c 由长度为 N 的前窗 f 与翻转后的后窗 b 卷积得到, 定义为

$$w_c(n) = f(n) * b(-n), \quad -N+1 \leq n \leq N-1. \quad (4)$$

通过选择不同的前窗与后窗,可以实现不同的全相位预处理方式. 若 $f = b = R_N$ (R_N 为矩形窗), 称为无窗方式; 若 f, b 中其一为矩形窗, 称为单窗方式; 若 $f = b \neq R_N$, 则称为双窗方式.

由于考虑了输入样点所有可能的采样分段, 与传统 FFT 谱分析方法相比, 全相位谱分析具有多种优良特性: 对于包含多个频率成分的时域信号, 全相位谱分析能更好地抑制频谱泄漏、减小谱间干扰; 特别是其具有的“相位不变性”使得主谱线处的相位等于对应频率分量的初始相位, 而不受频率偏差的影响. 即当信号存在频率偏差时, 传统 FFT 的相位谱与频率偏离值直接相关, 频偏值越大则主谱线上测得的相位值越不准确; 而从全相位谱分析相位谱的主谱线上即可得到高精度的信号初始相位. 因此, 全相位谱分析技术能够有效抑制频率扰动对信号的影响、获得准确的相位估计, 此性质在许多研究领域都具有很好的应用价值.

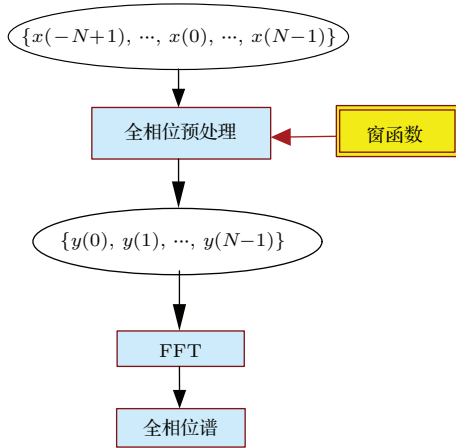


图1 全相位谱分析实现框图

Fig. 1. Schematic diagram of all-phase fast Fourier transformation.

3.2 全相位目标直接重构法

基于以上全相位谱分析理论, 将其引入相干场成像接收端的数据处理中, 提出一种新型全相位目标直接重构法: 融合了信号解调与图像重构过程, 无须设定精确频率进行传统解调, 实现了从时域回波信号采集到目标图像重构的全链路信号处理. 由于考虑到相位信息对目标重构至关重要, 因此采用全相位比值法^[11]进行频谱校正获得更精确的相位估计结果. 具体算法步骤如下:

步骤1 加长回波信号的采样长度为 $2N$, 实际用于处理的序列为 $2N - 1$ 维:

$$x(n) = \{x(-N + 1), \dots, x(0), \dots, x(N - 1)\}.$$

步骤2 对采样序列选择窗函数进行全相位预处理: $x_N(n) = x(n)w_c(n)$, 然后以样点 $x(0)$ 为中心叠加两段采样信号, 得到考虑了全部 N 个分段的时域全相位输入向量:

$$y(n) = [x(n)w_c(n) + x(n - N)w_c(n - N)]R_N(n).$$

步骤3 对全相位输入向量做 FFT, 即得到全相位谱 $Y(e^{j\omega})$:

$$Y(e^{j\omega}) = \frac{1}{2\pi} [X(e^{j\omega}) * W_c(e^{j\omega}) + e^{-jN\omega} X(e^{j\omega}) * W_c(e^{j\omega})] * R_N(e^{j\omega}).$$

步骤4 采用全相位比值法取单边全相位谱 $Y(e^{j\omega})$ 做频谱校正, 输出校正后 3 个实际拍频信号处的相位, 做相位闭合恢复该基线下的目标真实相位; 结合最大拍频处的主谱线幅值直接恢复该空间频率的目标真实频谱值.

步骤5 重复步骤1—步骤4, 遍历各个基线位置后, 得到覆盖全部频谱面的目标真实频谱矩阵 $O(u, v)$.

步骤6 对 $O(u, v)$ 做二维离散傅里叶逆变换重构出目标空域图像 $O(x, y)$:

$$O(x, y) = \sum_{u=0}^{W-1} \sum_{v=0}^{H-1} O(u, v) e^{j2\pi(ux/W + vy/H)},$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, W - 1;$$

$$y = 0, 1, 2, \dots, H - 1.$$

图2 为全相位目标直接重构法的实现框图.

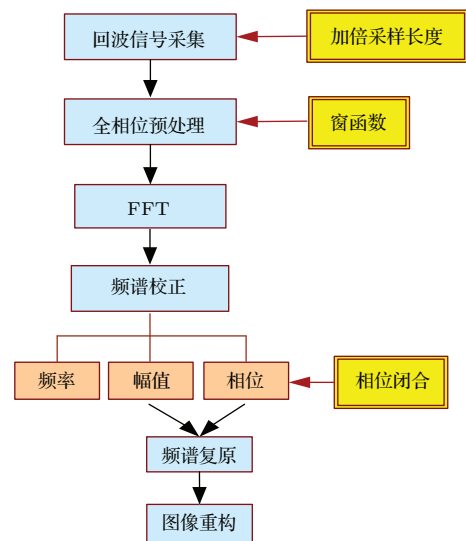


图2 全相位目标直接重构法的实现框图

Fig. 2. Schematic diagram of all-phase target reconstruction method.

4 实验结果与分析

为验证全相位目标直接重构法(简称“全相位法”)的有效性,首先进行仿真模拟分析,之后将其应用于相干场成像室外实验系统中,完成接收端的信号处理及目标重构.

室外实验系统的参数为:发射端激光器波长为1064 nm,成像探测距离为60 m,目标尺寸为4 mm,采用T型发射阵列,发射孔径单位间距为15 mm,每一时刻同时发射三束激光扫描照射目标,系统在通过频率调制后在基本频率40 MHz的基础上给光束1,2,3分别加入调制频移0,50,150 kHz,即三束激光两两间的拍频频率为 $\omega_{21} = 50$ kHz, $\omega_{32} = 100$ kHz, $\omega_{31} = 150$ kHz.

4.1 仿真模拟分析

采用Matlab软件进行数值模拟.通过模拟位于不同发射位置的三束激光扫描照射目标,对目标表面形成的瞬时电场强度按采样持续时间进行积分,得到由目标返回的时域回波能量信号作为重构过程的原始数据.依据实验系统的基本参数,设定仿真中的回波信号采样频率为500 kHz,传统法的采样点数为1000,在全相位法中加长采样长度到2000点,依据频率偏差情况选择合适的加窗方式做全相位预处理,叠加生成的全相位输入向量长度仍为1000点.

为验证全相位法“相位不变性”抑制频率扰动的能力,分两种情况给发射光束加入模拟频率误

差,采用全相位法和传统法分别计算出T型阵列水平轴及垂直轴每个基线位置提取的目标频谱分量所对应的闭合相位值,称为 u 轴及 v 轴目标闭合相位值,讨论如下.

1) 固定频率误差:用于模拟频率调制系统的固有误差.仿真中在理想无频率误差,以及给光束2的调制频率加入10% (5 kHz),20% (10 kHz),30% (15 kHz)固定频率误差的情况下,分别采用两种方法求出 u 轴目标闭合相位值.频差为10%,20%时采用无窗全相位预处理,频差30%时采用单窗全相位预处理,选择矩形窗和汉宁窗的卷积.在每臂孔径个数为10时,结果如图3所示.

由图3可知:传统法的闭合相位结果(图3(b))与无频率误差条件下有很大偏离,频率扰动使得解调运算后的目标闭合相位值完全偏离了真值;而图3(a)所示的全相位结果与无频差真值符合得很好,即使频率扰动达到30%,依然准确提取出了目标闭合相位,由此证明了全相位法的“相位不变性”.由于目标闭合相位只由目标自身形状所决定,因此在出现频率漂移的情况下,全相位法能够有效抑制固定频差、从回波信号中正确提取出相位信息实现目标图像重构.当光束1,3存在固定频率误差时可得到类似结果,限于篇幅不一一给出.

再给光束1模拟加入10% (5 kHz)的固定频差,可知将影响 ω_{21} 和 ω_{31} 两个拍频频率,分别采用传统法和全相位法进行目标图像重构,在T型阵列每臂孔径个数 $M = 10, 20$ 的条件下得到如图4所示的目标重构图像.

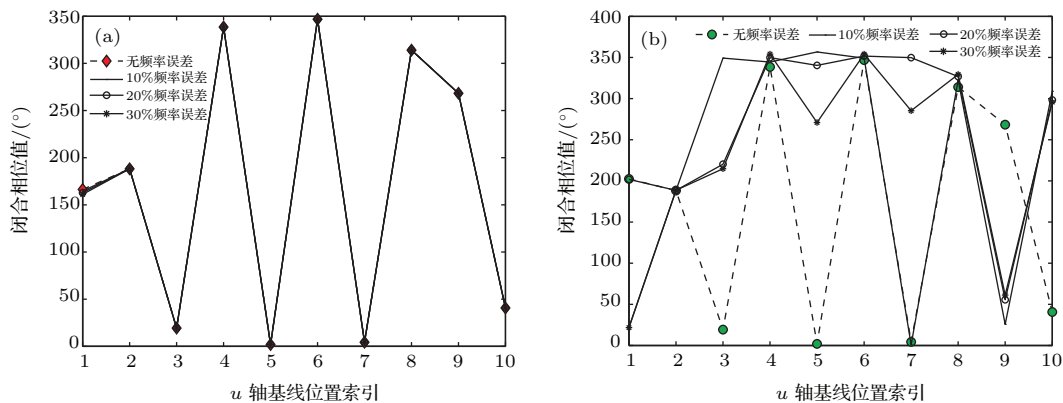


图3 光束2有固定频差时 u 轴目标闭合相位值 (a)全相位法; (b)传统法
 Fig. 3. The closed phase of u axis with beam 2 existing fixed frequency error: (a) all-phase method; (b) traditional method.

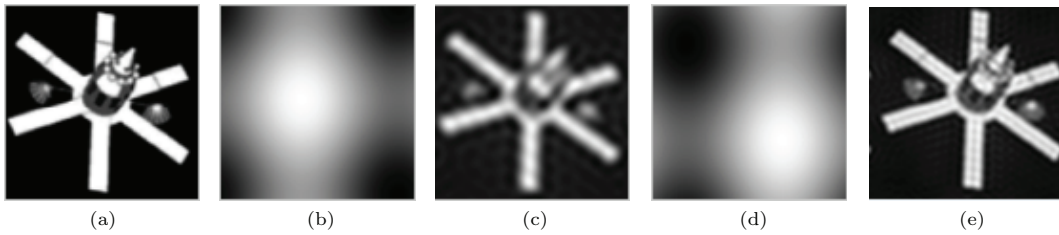


图4 固定频差模拟下的目标重构图像 (a) 原始目标; (b) 传统法 ($M = 10$); (c) 全相位法 ($M = 10$); (d) 传统法 ($M = 20$); (e) 全相位法 ($M = 20$)

Fig. 4. The reconstructed image with beam 1 existing fixed frequency error: (a) the target image; (b) traditional method ($M = 10$); (c) all-phase method ($M = 10$); (d) traditional method ($M = 20$); (e) all-phase method ($M = 20$).

由图4可知: 传统法在存在固定频率误差情况下完全无法重构目标(图4(b)和图4(d)), 由以上目标闭合相位值的偏离即能证明这一点; 而全相位法由于有效抑制了频率扰动对闭合相位的影响, 能够正确重构目标图像(图4(c)和图4(e)), 在孔径个数为20时可清晰辨识卫星目标上的标记.

2) 随机频率误差: 用于模拟大气湍流扰动、目标运动等因素导致的随机频率误差. 仿真中随着每组发射基线位置的改变, 给三束光加入不同的随机频率扰动: 光束1加入均值为10 kHz即20%的频

率误差, 随机波动误差范围为0—500 Hz; 光束2, 3加入波动范围为0—500 Hz的随机频率误差, 由此三束光两两形成的三个拍频频率将随发射基线位置的改变而随机变化; 同时, 在每一基线位置下给三束光模拟不同的初始随机相位, 以更加符合实际成像环境.

采用全相位法和传统法分别求出此成像条件下 u 轴、 v 轴的目标闭合相位值, 全相位法采用无窗预处理方式, 与无频差的目标真实闭合相位进行对比. 图5(a)—(d)分别给出了T型阵列每臂孔径个数 $M = 10, 20$ 时的结果.

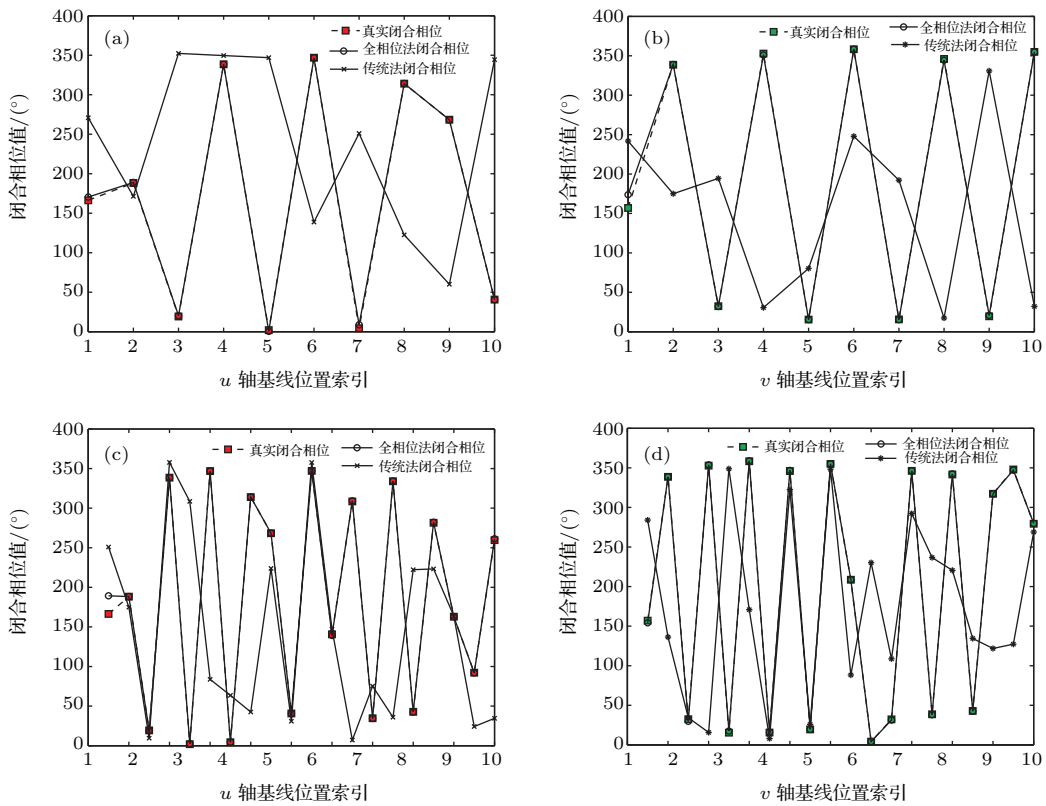


图5 随机频差模拟下两种方法的目标闭合相位值 (a) u 轴 ($M = 10$); (b) v 轴 ($M = 10$); (c) u 轴 ($M = 20$); (d) v 轴 ($M = 20$)

Fig. 5. Comparison of the closed phase when existing random frequency error: (a) u axis ($M = 10$); (b) v axis ($M = 10$); (c) u axis ($M = 20$); (d) v axis ($M = 20$).

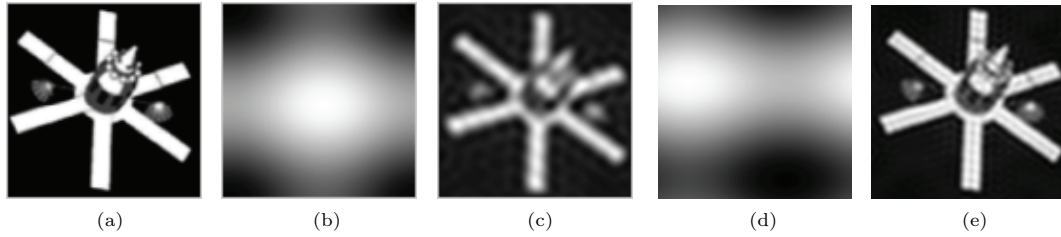


图6 随机频差模拟下的目标重构图像 (a) 原始目标; (b) 传统法 ($M = 10$); (c) 全相位法 ($M = 10$); (d) 传统法 ($M = 20$); (e) 全相位法 ($M = 20$)

Fig. 6. The reconstructed image when existing random frequency error: (a) the target image; (b) traditional method ($M = 10$); (c) all-phase method ($M = 10$); (d) traditional method ($M = 20$); (e) all-phase method ($M = 20$).

图5表明: 在三束光均存在随机频率扰动的情
况下, 全相位法得到的闭合相位值在 u 轴、 v 轴每个
基线位置均与目标真实闭合相位符合得很好, 表明
其具有的“相位不变性”能够有效抑制随机频差对
相位的扰动; 而传统法的结果则完全偏离目标真实
闭合相位, 这也解释了实际大气环境下传统法采用
固定解调方式无法正确重构目标图像的原因. 两种
方法的目标重构结果如图6所示.

从图6可以看出, 传统法完全失效, 全相位法
依然可正确重构目标图像, 对随机频率扰动具有很
好的鲁棒性, 证实了准确提取目标闭合相位是正确
重构目标的前提.

下面将全相位法应用于室外实验系统中, 以抑
制实际成像环境中多种频率扰动因素对成像的影
响, 解决传统法无法重构目标图像的难题.

4.2 室外实测数据分析

相干场成像室外实验系统分为发射端和接收
端两大部分, 其原理框图如图7所示.

室外实验系统的接收端采用光电探测器及数
据采集卡完成目标回波能量信号的光电转换及信
号采集. 通过在发射端由T型发射阵列(图8(a))
发射三束激光照明60 m远的实验目标, 控制三束

光遍历扫描所有可能的基线配置获取完整的目标
频谱信息, 在每个基线配置下采集目标返回的时域
能量信号, 在实验中设定数据采样率为4 MHz, 采
样点数为24000.

采用复杂度不同的三种透射式目标, 如
图8(b)—(d)所示, 其中各个目标的高宽尺寸为:
(b)六爪型, 3.8 mm × 3.8 mm; (c)字母S, 3.9 mm
× 3.1 mm; (d)字母A, 3.6 mm × 3.8 mm, 最大尺
寸均小于4 mm × 4 mm. 依据相干场成像原理, 在
室外系统的激光器波长及成像距离条件下, 设定单
位孔径间距 $d = 15$ mm 能够满足二维抽样定理的
约束条件, 对4 mm内目标无失真成像.

室外实验在真实大气环境下展开, 设定T型阵
列水平轴及竖直轴不同的孔径数量 N_x 和 N_y (不
包括中心孔径), 能够实现不同大小的阵列布局, 如
 $N_x = 7, N_y = 7$ 对应 15×8 的布局规模. 采集完
所有基线配置下的目标回波能量信号后, 分别应用
传统法和全相位法进行信号处理及图像重构, 结果
如图9—图11所示. 由于实际环境中光束的随机初
始相位未知, 会给复原图像带来平移, 为使视场中
总有一幅完整的目标, 对重构结果进行了三倍周期
延拓.

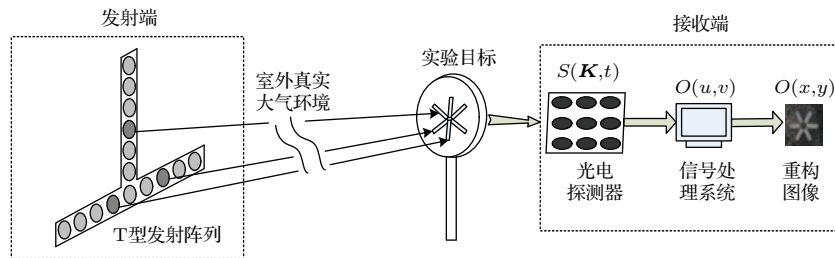


图7 相干场成像室外实验系统原理

Fig. 7. Schematic diagram of coherent field imaging system.

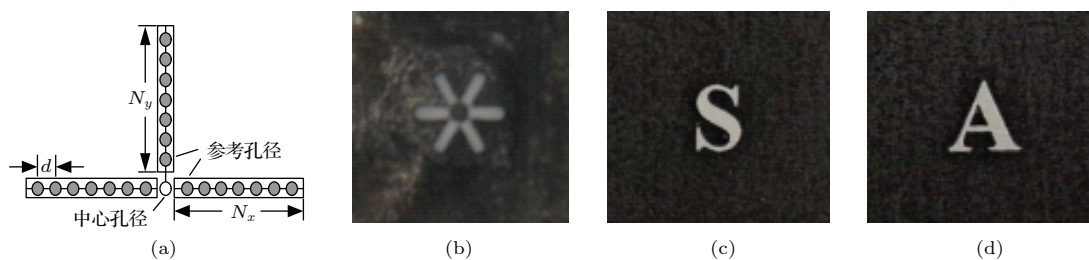


图8 T型阵列布局及实验目标 (a) T型阵列布局; (b) 六爪型; (c) 字母S; (d) 字母A

Fig. 8. T transmitter array and experimental targets: (a) T array; (b) six wings; (c) letter S; (d) letter A.

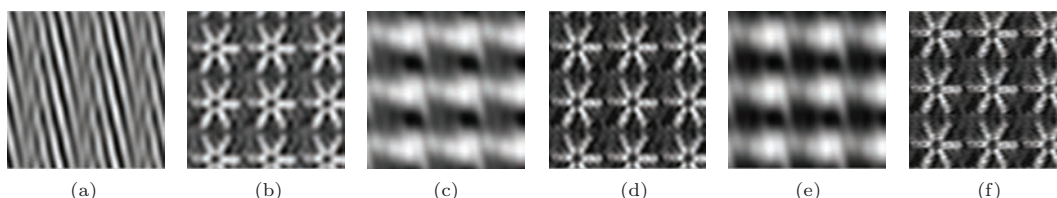


图9 六爪目标重构图像 (a) 传统法 (11 × 6); (b) 全相位法 (11 × 6); (c) 传统法 (15 × 8); (d) 全相位法 (15 × 8); (e) 传统法 (15 × 16); (f) 全相位法 (15 × 16)

Fig. 9. The reconstructed image of target six wings: (a) traditional method (11 × 6); (b) all-phase method (11 × 6); (c) traditional method (15 × 8); (d) all-phase method (15 × 8); (e) traditional method (15 × 16); (f) all-phase method (15 × 16).

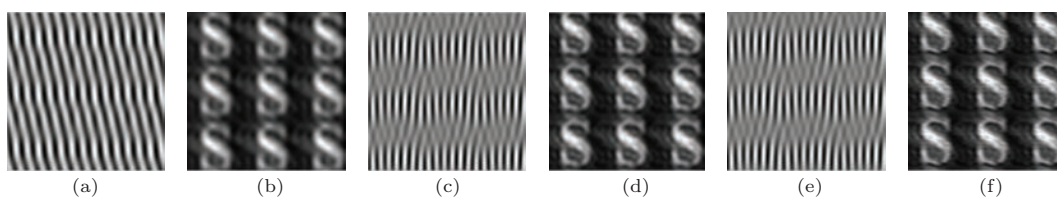


图10 S目标重构图像 (a) 传统法 (11 × 6); (b) 全相位法 (11 × 6); (c) 传统法 (15 × 8); (d) 全相位法 (15 × 8); (e) 传统法 (15 × 16); (f) 全相位法 (15 × 16)

Fig. 10. The reconstructed image of target letter S: (a) traditional method (11 × 6); (b) all-phase method (11 × 6); (c) traditional method (15 × 8); (d) all-phase method (15 × 8); (e) traditional method (15 × 16); (f) all-phase method (15 × 16).

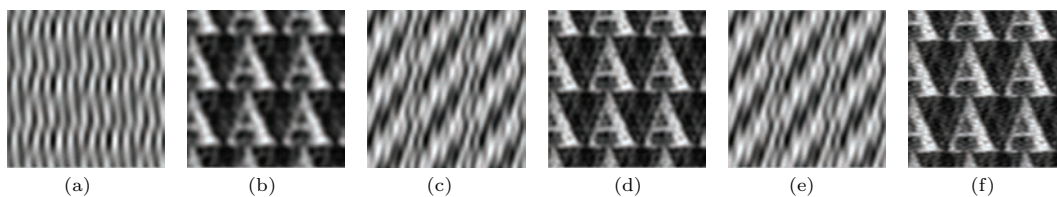


图11 A目标重构图像 (a) 传统法 (11 × 6); (b) 全相位法 (11 × 6); (c) 传统法 (15 × 8); (d) 全相位法 (15 × 8); (e) 传统法 (15 × 16); (f) 全相位法 (15 × 16)

Fig. 11. The reconstructed image of target letter A: (a) traditional method (11 × 6); (b) all-phase method (11 × 6); (c) traditional method (15 × 8); (d) all-phase method (15 × 8); (e) traditional method (15 × 16); (f) all-phase method (15 × 16).

由室外实测数据的重构结果可知: 在真实大气环境下传统法无法重构目标, 复原图像完全被噪声淹没; 与此相比, 全相位法能够正确重构目标图像, 且阵列规模越大即基线越长重构目标越清晰, 验证了相干场成像技术分辨率能够由拉长基线来提高的成像原理。

表1列出了 $N_x = 7, N_y = 7$ 条件下, 对S目标成像时全相位法在 u 轴、 v 轴频谱提取时对应每个基线位置的目标回波能量信号中3个拍频频率的实际值 (由于 u 轴、 v 轴各有一个参考孔径固定在空间坐标 (1, 0) 和 (0, 1) 处, 见图8(a)所示, 因此实际移动的基线个数分别为 $N_x - 1$ 和 $N_y - 1$)。

表1 全相位法对S目标成像得到的实际拍频(单位: Hz)

Table 1. The real beat frequency obtained by all-phase method in target letter S imaging.

	49675	49673	49679	49676	49673	49672
u 轴	100330	100320	100320	100330	100330	100330
	150030	149990	149990	150000	149990	150020
	50325	50326	50324	50330	50331	50331
v 轴	99980	99984	100010	100010	99992	100010
	150320	150330	150330	150280	150310	150320

由表1可知: 到达目标的实际拍频频率与预设频率 [50 kHz, 100 kHz, 150 kHz] 出现偏离, u 轴的最大频率偏差为 [-328 Hz, 330 Hz, 30 Hz], v 轴的最大频率偏差为 [331 Hz, -20 Hz, 330 Hz]. 在此扰动情况下, 全相位法有效抑制了频率误差对目标闭合相位的影响, 清晰重构目标(图10(d)), 证明了其在室外真实大气环境下切实有效.

实验中, 对三种目标采集的最大阵列规模为 15×16 , 即最长基线为 225 mm, 在此基线长度下, 依据望远镜成像角分辨率的理论公式:

$$\theta = 1.22(\lambda/D), \quad (5)$$

其中, λ 为激光波长, D 为等效口径, 可求出系统的衍射极限角分辨率为 $5.77 \mu\text{rad}$. 以六爪目标为例, 对实际重构图像图9(f)中可辨识的目标最小细节进行判读, 得到实际线分辨率为 0.35 mm, 在成像距离 60 m 的条件下可求出实际成像角分辨率为 $5.83 \mu\text{rad}$, 近似达到理论极限值.

进一步分析全相位法对三种目标的成像效果, 当竖直方向孔径个数增多时, 三种目标的重构质量都得到不同程度的提升, 六爪目标的图9(f)比图9(d)具有更清晰的目标轮廓, S目标和A目标也具有更好的目标细节, 因此在实验中应选择合理的孔径个数实现所要求的目标重构质量. 另外, 依据表1的频率偏差情况, 在应用全相位法做全相位预处理时比较了无窗、单窗和双窗三种不同的方式, 其中无窗方式获得的目标频谱最为准确, 因此采用无窗方式最终获得了满意的目标重构结果. 在下一步研究中, 室外实验系统还将应用反射式目标、加大成像距离, 在实验中我们将依据具体条件讨论选择合适的加窗方式.

5 结 论

目标回波信号处理与图像重构是相干场成像技术研究的核心内容. 由于在实际成像环境中存在多种扰动因素使得到达目标的实际频率出现偏

离, 导致采用固定解调方式的传统算法无法重构目标图像. 在此背景下, 提出一种对频率误差具有鲁棒性的新方法对相干场成像室外实验研究具有重要价值. 本文将全相位谱分析理论引入相干场成像技术, 提出一种新型全相位目标直接重构法. 通过对目标回波能量信号直接做全相位谱分析后准确提取目标闭合相位, 能够抑制多种频率误差对目标成像的影响, 准确复原目标频谱、重构目标空域图像. 经过仿真验证后应用于相干场成像室外实验系统, 在真实大气环境下清晰重构目标, 解决了传统法无法重构图像的难题, 推动了相干场成像技术的进步.

参考文献

- [1] Holmes R B, Ma S, Bhowmik A, Greninger C 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 351
- [2] Stapp J, Spivey B, Chen L, Leon L, Hughes K, Sandler D, Cuellar E L 2006 *Proc. SPIE* **6307** 630701
- [3] Cuellar E L, Cooper J, Mathis J, Fairchild P 2008 *Proc. SPIE* **7094** 70940G
- [4] Huang X D, Wang Z H, Luo P, Lü W 2011 *Acta Electron. Sin.* **39** 172 (in Chinese) [黄翔东, 王兆华, 罗蓬, 吕卫 2011 电子学报 **39** 172]
- [5] Chen W, Li Q, Wang Y G 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 3441 (in Chinese) [陈卫, 黎全, 王雁桂 2010 光学学报 **30** 3441]
- [6] Yu S H, Wang J L, Dong L, Liu X Y 2012 *Opt. Precision Eng.* **20** 2275 (in Chinese) [于树海, 王建立, 董磊, 刘欣悦 2012 光学精密工程 **20** 2275]
- [7] Liu Y Y, Lü Q B, Zhang W X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124201 (in Chinese) [刘扬扬, 吕群波, 张文喜 2012 物理学报 **61** 124201]
- [8] Zhang W X, Xiang L B, Kong X X, Li Y, Wu Z, Zhou Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164203 (in Chinese) [张文喜, 相里斌, 孔新新, 李扬, 伍洲, 周志盛 2013 物理学报 **62** 164203]
- [9] Spivey B, Stapp J, Sandler D 2006 *Proc. SPIE* **6307** 630702
- [10] Huang X D 2006 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [黄翔东 2006 博士学位论文(天津: 天津大学)]
- [11] Huang X D, Zhu Q Q, Du Y B, Jiang C L 2012 *Signal Process.* **28** 793 (in Chinese) [黄翔东, 朱晴晴, 杜宇彬, 蒋长丽 2012 信号处理 **28** 793]

All-phase target reconstruction method for coherent field imaging*

Cao Bei[†] Luo Xiu-Juan Chen Ming-Lai Zhang Yu

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 3 November 2014; revised manuscript received 18 December 2014)

Abstract

Received signal processing and target reconstruction technique plays a key role in coherent field imaging, and directly influences the quality of the reconstructed image of a target. Based on all-phase fast Fourier transformation (FFT) spectrum analysis theory, a new processing and reconstruction method is proposed. By directly extracting the phase and amplitude information from all-phase FFT spectrum of the return signal, the proposed all-phase target reconstruction method is capable of inhibiting the frequency error caused by many factors, thus reconstructing the target image more precisely. The validity of the proposed method is proved by a coherent field imaging system in outdoor environments, and it has a better reconstruction performance than a traditional method. The resolution of the reconstructed target is close to a theoretical diffraction limit.

Keywords: coherent field imaging, target reconstruction, all-phase, frequency correction

PACS: 42.30.Wb, 43.60.Hj, 07.05.Fb

DOI: [10.7498/aps.64.124205](https://doi.org/10.7498/aps.64.124205)

* Project supported by the "Dr. Western Fund Project" of "Western Light" Talent Cultivation Plan of Chinese Academy of Sciences (Grant No. Y429621213).

[†] Corresponding author. E-mail: candy@opt.ac.cn