

非成像外差阵列探测器受空间相位畸变的影响分析

董洪舟, 刘 永, 杨春平, 敖明武, 吴 健

电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054

摘要 以失配角为例, 与相同尺寸的单点探测器比较, 理论结合数值计算分析了空间相位畸变对非成像阵列探测器的影响。结果表明, 阵列中各单元信号的附加相位将严重影响这种探测方式的性能。因此, 就空间相位畸变而言, 简单的线性叠加方式不足以克服其影响。根据分析结果指出, 若能通过一定方法消除阵列中各单元输出信号的附加相位, 即使在空间畸变很严重的情况下, 非成像阵列探测器仍然可以大幅提高系统的信噪比。丰富了非成像阵列探测器在外差探测领域的研究, 对其应用具有一定的指导意义。

关键词 信号处理; 外差探测; 阵列探测器; 失配角; 空间相位畸变; 信噪比

中图分类号 TN958 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0407001

Influence of Spatial Phase Aberration on Heterodyne Non-Imaging Array Detector

Dong Hongzhou, Liu Yong, Yang Chunping, Ao Mingwu, Wu Jian

School of Optoelectronic Information, University of Electronic Sciences and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract Taking the mismatch angle between signal and local oscillator beams as an example, we analyze the influence of spatial phase aberration on the heterodyne non-imaging array detector based on theoretical derivation and numerical calculation, and compare the array detector with the single detector with the same size. The research results reveal that the attached phase term of the signal output from detector element will severely affect the performance of the non-imaging array detector. Therefore, when only the spatial phase aberration is concerned, the array detector with a simple linear superposition cannot contribute to the performance improvement of the system. If the attached phase in the signal of detector element is eliminated by a certain method, the non-imaging array detector can increase greatly the signal-to-noise ratio of the heterodyne system even if the aberration is severe. Our results enrich the research of the non-imaging array detector in heterodyne detection and have guiding significance for the application of this technology.

Key words signal processing; heterodyne detection; array detector; mismatch angle; spatial phase aberration; signal-to-noise ratio

OCIS codes 070.7345; 050.1960; 050.1970

1 引 言

在光学外差探测领域, 阵列探测器一般作为成像器件用来成像^[1-2]。相对于单点探测器, 阵列探测器具有总光敏面积大/探测单元小的特点。若阵列探测器以各单元输出电流线性求和的方式, 代替单点探测器进行目标点信息探测(区别于成像探测), 可以增大接收系统的视场角, 从而充分接收信号光功率。同时, 由于探测单元光敏面依然较小, 不影响对高频信号的探测。关于阵列探测器进行点信息探测的研究相对较少^[3-8]。文献[3]分析了这种非成像阵列探测器的信噪比, 并得出阵列探测器可以较大幅度提高信噪比的结论, 但在分析过程中假设了信号光与本振光的波前在探测器光敏面上处处匹配, 因此没有考虑空间相位畸变

收稿日期: 2016-11-21; **收到修改稿日期:** 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(61308109)

作者简介: 董洪舟(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事相干探测、激光雷达等方面的研究。E-mail: hzdong@uestc.edu.cn

对这种探测器的性能影响。

实际上,空间相位畸变总是难以避免的,会导致两光束波前失配,从而降低系统的信噪比。由于空间相位畸变在较小的探测单元上的分布相对较为平缓,因此单个探测单元受空间相位畸变的影响相对较小。一个极端例子是,阵列中有无穷多个探测单元,且单元尺寸无穷小。此时在每个单元范围内的光场可视为没有任何空间相位畸变。从这个角度考虑,多个单元的信号叠加输出可能降低畸变影响。但线性叠加时各单元输出信号有不同的附加相位,属于非等相位叠加,此时会降低信号的强度。为了探究这种矛盾的情况,有必要就空间相位畸变对阵列探测器的影响进行分析。

文献[3]的分析是基于阵列探测器可以增大视场角的特点进行的,为了与单点探测器比较,假设了单点探测器尺寸与阵列中单元尺寸相同。这样的比较可以更直观地分析阵列探测器大视场角时的性能。由于空间相位畸变的影响与探测器几何尺寸有必然联系,与文献[3]类似,为了更为直观地分析阵列探测器的性能,本文将其与单点探测器进行比较,分析中假设单点探测器尺寸和阵列探测器总的尺寸相同。本文以空间失配角为例,基于高斯光束模式进行了数值计算分析,结果表明在相同畸变情况下,与单点探测器相比,简单线性求和的阵列探测器并不能得到更好的探测性能。但若通过一定的方法消除各单元的附加相位,即使在畸变严重的情况下,阵列探测器也能得到比单点探测器更高的信噪比。因为各单元附加相位存在于其输出的电信号中,不同于直接消除空间相位畸变面临的困难,附加相位通过合适的算法相对容易处理。

2 相关基本理论

在外差探测中,信号光与本振光光场可以表示为

$$E_M(x, y, t) = E_M(x, y) \exp [i\omega_M t + i\varphi_M(x, y) + i\varphi_{M0}], \quad (1)$$

式中 M 代表 S 或 L, $E_S(x, y)$ 和 $E_L(x, y)$ 分别为信号光与本振光的复振幅, ω_S 和 ω_L 为信号光与本振光的角频率, $\varphi_S(x, y)$ 和 $\varphi_L(x, y)$ 为与空间位置有关的相位项, φ_{S0} 和 φ_{L0} 为常数相位项。设两光束偏振方向相同,则在探测器光敏面上的光强分布为

$$I(x, y, t) = |E_S(x, y)|^2 + |E_L(x, y)|^2 + |E_S(x, y)| |E_L(x, y)| \exp [i\omega_h t + i\Delta\varphi(x, y) + i\Delta\varphi_0] + c.c., \quad (2)$$

式中 c.c. 表示共轭项, $\omega_h = \omega_S - \omega_L$ 为外差信号的角频率, $\Delta\varphi_0 = \varphi_{S0} - \varphi_{L0}$, $\Delta\varphi(x, y) = \varphi_S(x, y) - \varphi_L(x, y)$ 。因为与随后的分析无关, $\Delta\varphi_0$ 可以忽略。当 $\Delta\varphi(x, y)$ 不为常数,或者说与空间位置有关时,可以定义其为空间相位畸变。 $\Delta\varphi(x, y)$ 将严重影响外差探测的性能^[9], 它也正是随后主要分析的对象。

线性求和阵列探测器接收方式如图 1(a) 所示。阵列探测器的几何结构如图 1(b) 所示。阵列中的单元数为 $N \times N$, 阵列的边长为 a 。阵列中第 m 行、第 n 列的单元输出的电流可以表示为

$$i_{m,n}(t) = i_{m,n}^{DC} + i_{m,n}^h(t), \quad (3)$$

式中 $i_{m,n}^{DC}$ 为直流电流, $i_{m,n}^h(t)$ 为外差信号电流, 且有

$$i_{m,n}^{DC} = \frac{q_c \eta}{h\nu} \iint_{A_{m,n}} (|E_S(x, y)|^2 + |E_L(x, y)|^2) dx dy, \quad (4)$$

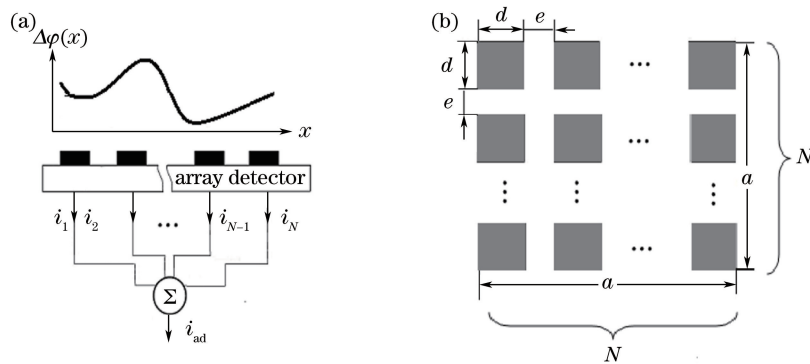


图 1 (a) 阵列探测器工作原理; (b) 阵列探测器结构图

Fig. 1 (a) Schematic of the operation of the array detector; (b) configuration of the array detector

$$i_{m,n}^h(t) = \frac{q_e \eta}{h\nu} \iint_{A_{m,n}} |E_S(x,y)E_L(x,y)| \times \exp[i\omega_h t + i\Delta\varphi(x,y)] dx dy + c.c., \quad (5)$$

式中 $A_{m,n} = d^2$ 为探测单元的光敏面积, η 为量子效率, h 为普朗克常量, q_e 为电子电荷, ν 为光频率。(5)式可以变形为

$$i_{m,n}^h(t) = \sqrt{\alpha_{m,n}^2 + \beta_{m,n}^2} \sin(\omega_h t + \theta_{m,n}), \quad (6)$$

式中

$$\alpha_{m,n} = \frac{q_e \eta}{h\nu} \iint_{A_{m,n}} |E_S(x,y)| |E_L(x,y)| \cos[\Delta\varphi(x,y)] dx dy, \quad (7)$$

$$\beta_{m,n} = \frac{q_e \eta}{h\nu} \iint_{A_{m,n}} |E_S(x,y)| |E_L(x,y)| \sin[\Delta\varphi(x,y)] dx dy, \quad (8)$$

$$\theta_{m,n} = \arctan(\alpha_{m,n}/\beta_{m,n}). \quad (9)$$

考察(6)式中的附加相位值 $\theta_{m,n}$ 。若畸变是由失配角或光学系统像差造成的,该畸变可以视为不随时间变化的,从(9)式可知 $\theta_{m,n}$ 也是非时变的;若是由大气湍流引起的,虽然湍流是时变的,但变化频率很低,通常几十至几百赫兹,当考察的信号时间较短时,由湍流引起的畸变也可以看作不随时间变化的。因此,当所有单元的外差信号输出求和时,可以视为相干叠加。用 $i_{ad}^h(t)$ 表示阵列探测器输出的信号电流之和,则

$$i_{ad}^h(t) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N i_{m,n}^h(t). \quad (10)$$

将阵列探测器与单点探测器进行计算比较,并假设单点探测器的光敏面积 $A = a^2$, 即阵列探测器总的面积与单点探测器光敏面积相等。这样的假设可以充分比较两种探测器受相同空间相位畸变影响时的性能差别。用 $i_{sd}^{DC}(t)$ 和 $i_{sd}^h(t)$ 分别表示单点探测器的直流电流和信号电流,将(4)、(5)式中的积分面积 $A_{m,n}$ 改为 A 即可得到它们的表达式。

3 噪声电流

当本振光功率远大于信号光功率时,探测器输出的噪声主要以散粒噪声为主。该电流服从零均值的正态分布。由于通常探测器输出电流要经过一个带通滤波器,单点探测器噪声均方根电流可以表示为^[10]

$$i_{sd}^{nois} = \sqrt{2q_e i_{sd}^{DC} B}, \quad (11)$$

式中 B 为带通滤波器的带宽。对于阵列探测器来说,其单元输出的噪声均方根电流为

$$i_{m,n}^{nois} = \sqrt{2q_e i_{m,n}^{DC} B}. \quad (12)$$

由于各单元输出的噪声之和为非相干叠加,叠加后的噪声仍然为零均值的正态分布,且均方根为

$$i_{ad}^{nois} = \sqrt{\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N (i_{m,n}^{nois})^2}. \quad (13)$$

因此,经过带通滤波器滤除直流量后,单点探测器和阵列探测器总的带限输出可以表示为

$$i_{sd}(t) = i_{sd}^h(t) + i_{sd}^{nois}(t), \quad i_{ad}(t) = i_{ad}^h(t) + i_{ad}^{nois}(t). \quad (14)$$

4 空间失配角

多种因素可以导致空间相位畸变,如空间失配角、接收光学系统像差、大气湍流等。空间失配角会导致光束的波面倾斜,是一种严重影响外差探测性能的因素。研究表明通常几毫弧度的角度失配将使外差效率减小到 50% 以下^[11],也有实验证实只有当信号光与本振光的夹角小于 0.015° 时,对微弱信号的检测才有较好的效果^[12],因此外差探测对失配角是极其敏感的。以空间失配角为例,分析其对阵列探测器探测性能的影响。

假设本振光和信号光都为高斯光束,本振光垂直入射到探测器光敏面上,且其光腰与光敏面重合,而信号光以角度 γ 入射到探测器上,其光腰中心与光敏面重合,如图 2 所示。图中 Oxy 平面为探测器光敏面,则该面上的本振光场可以表示为

$$E_L(x, y) = \frac{E_{0L}}{\omega_{0L}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_{0L}^2}\right) \exp(i\varphi_L), \quad (15)$$

式中 E_{0L} 为常数, ω_{0L} 和 φ_L 为光束的束腰半径和常数相位项。光敏面上信号光场可以表示为

$$E_S(x, y) = \frac{E_{0S}}{\omega_S(z')} \exp\left[-\frac{x'^2 + y'^2}{\omega_S^2(z')}\right] \exp\left\{ik_S \left[z' + \frac{x'^2 + y'^2}{2R_S(z')}\right] - i\arctan \frac{z'}{f_S} + i\varphi_S\right\}, \quad (16)$$

式中 ω_{0S} 为信号光束腰半径, φ_S 为常数相位, $f_S = \pi\omega_{0S}^2/\lambda_S$, 且

$$x' = x \cos \gamma, \quad z' = x \sin \gamma, \quad (17)$$

$$\omega_S(z') = \omega_{0S} [1 + (z'/f_S)^2]^{1/2}, \quad (18)$$

$$R_S(z') = z' + f_S^2/z'. \quad (19)$$

将(15)、(16)式与(1)式对比, 可以得出(6)式中

$$E_S(x, y) = \frac{E_{0S}}{\omega_S(z')} \exp\left[-\frac{x'^2 + y'^2}{\omega_S^2(z')}\right], \quad (20)$$

$$E_L(x, y) = \frac{E_{0L}}{\omega_{0L}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_{0L}^2}\right), \quad (21)$$

$$\Delta\varphi(x, y) = k_S \left[z' + \frac{x'^2 + y'^2}{2R_S(z')}\right] - \arctan \frac{z'}{f_S}. \quad (22)$$

根据(20)~(22)式进行具体的数值计算分析。

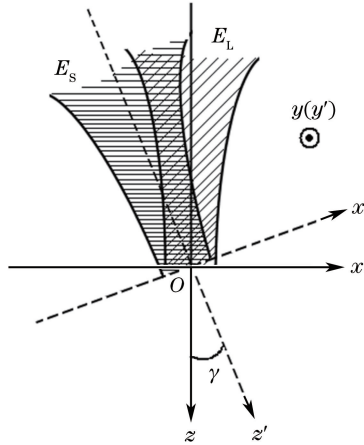


图 2 基于高斯光束的空间失配角示意图

Fig. 2 Schematic of spatial mismatch angle based on Gaussian beam

5 信噪比

定义阵列探测器信号输出的信号功率和噪声功率为 P_{ad}^S 和 P_{ad}^{nois} , 则

$$P_{ad}^S = \frac{1}{T_h} \int_0^{T_h} (i_{ad}^h)^2 R_L dt, \quad P_{ad}^{nois} = (i_{ad}^{nois})^2 R_L, \quad (23)$$

式中 T_h 为信号周期。将(23)式中的 i_{ad}^h 和 i_{ad}^{nois} 分别替换为 i_{sd}^h 和 i_{sd}^{nois} 即可得到单点探测器的信号功率 P_{sd}^S 和噪声功率 P_{sd}^{nois} 。设阵列探测器和单点探测器的信噪比分别为 R_{ad} 和 R_{sd} , 则有

$$R_{ad} = P_{ad}^S / P_{ad}^{nois}, \quad R_{sd} = P_{sd}^S / P_{sd}^{nois}. \quad (24)$$

在随后的数值分析中, 将产生逐渐增大的空间失配角度, 然后考察 R_{ad} 和 R_{sd} 随角度的变化情况。

6 数值计算

相同尺寸的阵列中单元数越多, 畸变在每个单元对应的起伏越平缓。先考察所有单元信号求和输出的振幅情况。阵列探测器的信号电流由(10)式计算, 将(6)式代入(10)式, 可以得到

$$i_{ad}^h(t) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \sqrt{\alpha_{m,n}^2 + \beta_{m,n}^2} \sin(\omega_h t + \theta_{m,n}). \quad (25)$$

单点探测器的信号电流 $i_{sd}^h(t)$, 只需令(25)式中的 $N=1$, 且(5)式中的积分面积换为单点探测器光敏面积 A 即可。为了单独分析振幅的变化情况, 先设求和为等相位叠加, 即设(25)式中 $\theta_{m,n}=0$ 。此时信号之和为

$$i_{ad}^h(t) = \rho_{ad} \times \sin(\omega_h t), \quad (26)$$

式中 $\rho_{ad} = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \sqrt{\alpha_{m,n}^2 + \beta_{m,n}^2}$ 。同时, 设单点探测器输出信号电流振幅为 ρ_{sd} 。

图 3 给出了两种探测器振幅随角度 γ 的变化情况, 波长 $\lambda=10 \mu\text{m}$ 、 $a=2 \text{ mm}$ 、信号光束腰半径 $\omega_{0s}=a/2$ 、本振光束腰半径 $\omega_{0L}=a/2$ 。图中结果显示, 在没有畸变($\gamma=0$)和畸变不严重的区域, 阵列探测器没有表现出优势。这是因为畸变不严重时, 由于阵列探测器存在单元间距, 接收到的信号光能相对单点探测器更少, 因此性能受限。实际应用中, 可以通过阵列微透镜消除这一现象。而实际应用中畸变往往是严重的, 此时即使阵列探测器接收到的信号光功率有所损失, 其振幅强度相对于单点探测器还是有显著的提高。且随着单元面积减小, 振幅强度能得到进一步加强。但当考虑各单元信号的附加相位时, 即(25)式中 $\theta_{m,n} \neq 0$, 此时定义 ρ_{ad}^* 为叠加后信号的振幅, 图 3(b)所示为 ρ_{ad}^* 随角度的变化情况。与单点探测器比较, 因为非等相位叠加的原因, 阵列探测器输出信号振幅更小。图中也可以看出, 不同单元数的阵列曲线几乎重合。这可以解释如下: 在相同阵列尺寸内, 虽然阵列单元越小, 在其范围内畸变越平缓, 受畸变影响也越小, 但因为叠加的信号路数增多(N 增大), 非等相位影响增大。两种因素的抵消, 导致各个阵列的振幅曲线基本重合。对比两种情况可以看出, 若是能通过一定方法消除各单元信号的附加相位 $\theta_{m,n}$, 阵列探测器在增强信号强度上具有很大的优势。

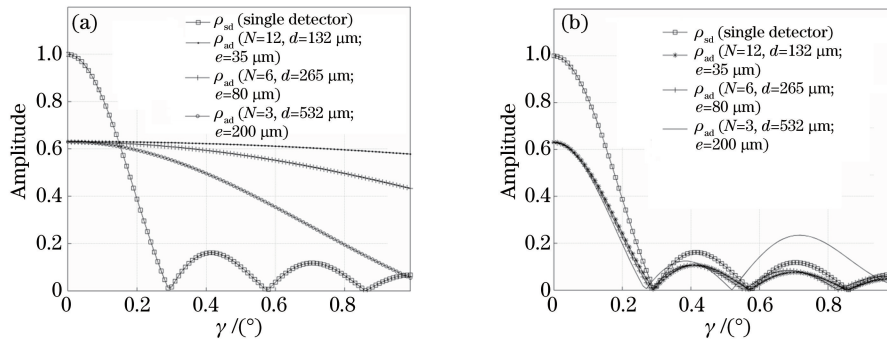


图 3 (a) $\theta_{m,n}=0$ 时不同单元数的阵列探测器输出信号振幅随 γ 的变化情况;

(b) $\theta_{m,n} \neq 0$ 时不同单元数的阵列探测器输出信号振幅随 γ 的变化情况。图中所有振幅被 ρ_{sd} 的最大值归一化

Fig. 3 (a) Amplitude of the array detector with different number of elements versus γ when $\theta_{m,n}=0$;

(b) amplitude of the array detector with different number of elements versus γ when $\theta_{m,n} \neq 0$.

All amplitudes are normalized by the maximum ρ_{sd}

因假设噪声电流主要由本振光功率引起的散粒噪声引起, 根据(11)式和(13)式, 通过计算两种探测器的直流电流即可得到噪声电流。定义两种均方根电流的比值

$$R_{\text{nois}} = \frac{i_{ad}^{\text{nois}}}{i_{sd}^{\text{nois}}}, \quad (27)$$

图 9 所示为 R_{nois} 随不同单元数阵列的变化情况, 可以看出, 与单点探测器噪声电流相比, 由于非相干叠加的原因, 阵列探测器噪声电流有一定的下降, 但幅度不大。并且随着阵列数的增加, 噪声电流强度有振荡下降的趋势。

图 5(a)和图 5(b)分别为 $\theta_{m,n}=0$ 和 $\theta_{m,n} \neq 0$ 情况下两种探测器的信噪比随失配角的变化情况。结果与前面的分析吻合, 即若各单元的附加相位能被消除, 阵列探测器表现出良好的性能, 否则与单点探测器相比系统信噪比反而恶化。

在光学外差探测中, 若能直接消除光束的空间相位畸变, 对系统探测无疑是有益的。一般来说可以利用自适应光学技术^[13]或相位共轭技术^[14-15]。自适应光学技术相对成熟, 但系统复杂, 需要声光、电光器件和变

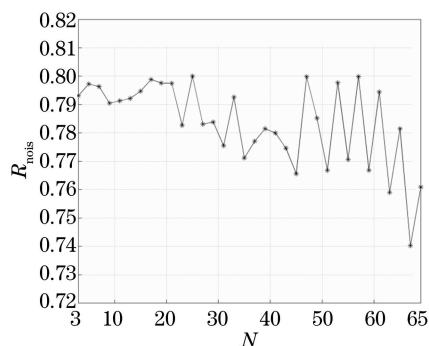


图 4 两种探测器噪声电流比值随阵列参数 N 的变化

Fig. 4 Ratio of the root mean square currents of two kinds of detectors versus parameter N

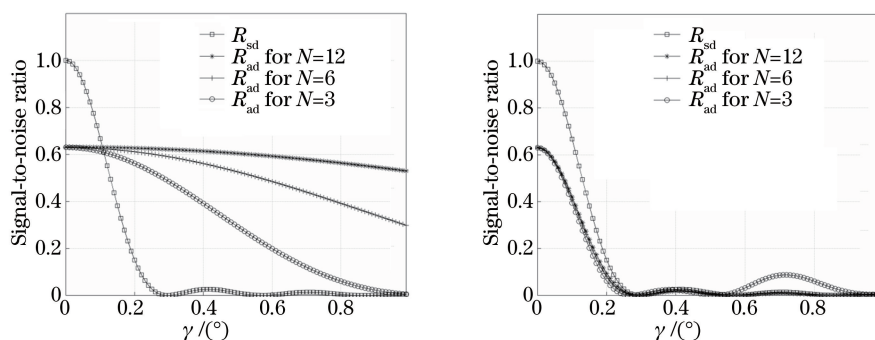


图 5 (a) $\theta_{m,n} = 0$ 时两种探测器信噪比对比情况; (b) $\theta_{m,n} \neq 0$ 时两种探测器信噪比对比情况

Fig. 5 (a) Comparison of the signal-to-noise ratio of two kinds of detectors when $\theta_{m,n} = 0$;

(b) comparison of the signal-to-noise ratio of two kinds of detectors when $\theta_{m,n} \neq 0$

形镜及其伺服系统, 无论从工程实现和成本上都有难度。相位共轭技术中, 要想产生与畸变波前相同的匹配波前, 对光束入射到晶体的位置和角度有较高要求, 从而导致工程应用中的调整困难, 而且即使忽略这个问题, 共轭反射率依然很低, 因此相位共轭技术产生匹配波前目前看来工程应用中难以有效实现。本文结果表明, 只要消除阵列探测器中各单元信号的附加相位 $\theta_{m,n}$, 也可以有效克服空间相位畸变的影响。且 $\theta_{m,n}$ 存在于探测器输出的电信号之中, 若对各单元的输出进行单独采样, 再通过适当的数字信号处理算法, 如相位互相关检测技术、序列移位叠加技术等, 附加相位相对容易消除。以序列移位叠加技术为例, 因为外差信号具有余弦函数的形式, 因此模数转换器输出的相邻采样数据之间存在固定的相位差。基于此特点, 若将各单元输出的信号序列移位不同的步数, 且各序列移位步数正比于其附加相位值, 再将各序列叠加求和, 即可消除附加相位。序列移位步数可以通过模拟退火法、遗传算法, 以信噪比或信号强度为评价函数, 通过搜索确定。

7 结 论

分析了空间相位畸变对非成像阵列探测器的影响。以两光束失配角为例, 基于高斯光束模式, 理论推导结合数值计算分析了非成像阵列探测器的信噪比情况。结果表明, 与相同尺寸的单点探测器相比, 若不消除各单元输出信号的附加相位, 阵列探测器并没有性能优势。这并非否定非成像阵列探测器在点信息探测上的应用, 因为实际探测中, 一种技术的性能不是由空间相位畸变完全决定的。分析结果显示, 考虑到增大的视场角, 阵列探测器具有比单点探测器更高的外差信噪比。针对空间相位畸变影响的问题, 若对各单元输出信号单独采样, 然后利用相关检测等数字技术消除各信号的附加相位, 则可以大幅降低空间相位畸变对探测性能的影响。研究内容进一步丰富了非成像阵列探测器的应用分析, 指出了在空间相位畸变存在时, 这种新的探测方法的研究方向。研究结果为阵列探测器应用于点信息外差探测技术提供了参考。

参 考 文 献

[1] Meier A H, Roesgen T. Imaging laser Doppler velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(4): 1017-1026.

- [2] Jiang L A, Lu J X. Heterodyne detection with a weak local oscillator[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1486-1503.
- [3] Dong Hongzhou, Yang Ruofu, Yang Chunping, *et al.* Analysis on the performance of heterodyne system with non-imaging array detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1204001.
董洪舟, 杨若夫, 杨春平, 等. 非成像阵列探测器外差系统性能分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1204001.
- [4] Luo Hanjun, Yuan Xiuhua. Accuracy of photon pulsed heterodyne detection system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1208004.
罗韩君, 元秀华. 光子脉冲外差探测系统的测距精度[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1208004.
- [5] Ye Song, Xiong Wei, Wang Xinqiang, *et al.* Correction of spatial heterodyne interferogram based on frequency domain analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0530001.
叶松, 熊伟, 王新强, 等. 基于频域分析的空间外差干涉图校正方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0530001.
- [6] Dong Hongzhou, Ao Mingwu, Yang Ruofu, *et al.* Study on the angle mismatching heterodyne detection technology based on array detector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 081202.
董洪舟, 敖明武, 杨若夫, 等. 基于阵列探测器的空间失配角匹配外差探测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 081202.
- [7] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达的透镜焦面阵列外差接收光学天线: CN101630006[P]. 2011-08-24.
- [8] Lu Dong, Sun Jianfeng, Zhou Yu, *et al.* Analysis on detection capability of wide field receiving synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728003.
卢栋, 孙建锋, 周煜, 等. 大视场接收合成孔径激光成像雷达探测能力分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0728003.
- [9] Fink D. Coherent detection signal-to-noise[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(3): 689-690.
- [10] Fink D, Samuel N V. Coherent detection SNR of an array of detectors[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(2): 453-454.
- [11] Zhao Changzheng, Jiao Binliang, Chen Wenxin. Effect of light collimation on heterodyne efficiency for space coherent optical communication[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(3): 406-413.
赵长政, 焦斌亮, 陈文新. 光束准直性对星间相干光通信外差效率的影响[J]. *半导体光电*, 2007, 28(3): 406-413.
- [12] Bai Shiwu, Gong Yuliang. Effect of spatial collimation on signal-to-noise ratio of laser heterodyne interferometry[J]. *Optical Instruments*, 1994, 16(1): 1-5.
白世武, 龚育良. 空间准直性对激光外差干涉信噪比的影响[J]. *光学仪器*, 1994, 16(1): 1-5.
- [13] Weyrauch T, Vorontsov M A. Free-space laser communication with adaptive optics: atmospheric compensation experiments[J]. *Journal of Optical Fiber Communications Reports*, 2004, 1(4): 355-379.
- [14] Shamir J, Caulfield H J, Hendrickson B M. Wave-front conjugation and amplification for optical communication through distorting media[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(14): 2912-2914.
- [15] He Q C, Shamir J, Duthie J G. Wavefront conjugation and amplification for optical communication through distorting media: experimental[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(2): 306-316.