

文章编号: 0253-2239(2009)05-1408-08

合成孔径激光成像雷达(V):成像分辨率和 天线孔径函数

刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 基于合成孔径激光成像雷达(SAIL)二维数据收集方程和成像算法,研究了圆形孔径和矩形孔径光学望远镜天线的方位向成像分辨率,导出了点扩展函数的解析表达式,分析了理想成像点尺寸及其光学足迹中心偏离、相位二次项匹配滤波失匹、空间采样宽度、采样周期等的影响;也研究了距离向成像分辨率并分析了非线性啁啾补偿等的影响。对于各种影响因素都给出了数学判据,特别是发现了矩形孔径的光学望远镜可以产生适合于 SAIL 扫描方式的矩形光学足迹并消除方位向分辨率不均匀降低,可以设计最佳的矩形孔径的尺度分别控制光学足迹在方位向及其垂直方向上的尺度,得到大扫描宽度和高方位向分辨率;也发现了目标外差延时必须尽量小以克服非线性啁啾和初始光频不稳定性相位误差。

关键词 合成孔径激光成像雷达;圆形孔径;矩形孔径;点目标激光雷达数据收集方程;方位向分辨率;距离向分辨率;点扩展函数;外差接收方向性函数;光束发散度函数

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1408

Synthetic Aperture Imaging Ladar(V): Imaging Resolution and Antenna Aperture Function

Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The azimuth imaging resolution of synthetic aperture imaging ladar (SAIL) using the telescopes with circular and rectangular apertures is investigated based on the point target SAIL data collection equation, and the analytic expressions of point spread function for imaging are correspondingly achieved. The ideal resolution spot and its degradation due to the target deviation vertically from the footprint center, the mismatch of matched filtering from the quadratic phase history, and the limited width and period for sampling are discussed. And the deficient compensation of phase errors of nonlinear chirping and the others related to range resolution are also detailed. Mathematical criteria are derived for all of these factors. Moreover, an explanation to the resulted azimuth resolution from the earlier experiment in our laboratory-scaled SAIL is given to verify the developed theory. As a conclusion, it is found that the antenna of rectangular aperture telescope can provide a rectangular footprint more suitable for the SAIL scanning format, and this leads not only to an elimination of resolution degradation but also to an optimal design of aperture to give both a fine resolution and a wide scan strip. And it is also found that the delay between the target and the local oscillator must be small enough to eliminate the phase errors from nonlinear chirping and optical frequency instability.

Key words synthetic aperture imaging ladar (SAIL); circular aperture; rectangular aperture; point target SAIL data collection equation; resolution in azimuth domain; resolution in range domain; point spread function (PSF); directivity function of heterodyne detection; divergence function of beam

1 引言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的原理来自于

微波合成孔径雷达(SAR),是能够在远距离获得厘米量级分辨率的唯一的成像观察手段,美国已

收稿日期: 2009-01-15; 收到修改稿日期: 2009-02-10

作者简介: 刘立人(1942-),男,研究员,博士生导师,目前主要从事空间激光通信,激光雷达和工程光学检测设备等方面的研究。E-mail: lirenliu@mail.shenc.ac.cn

经给出实验室验证^[1,2],并实现了机载合成孔径激光雷达样机^[3]。微波合成孔径雷达的方位向孔径合成的理想成像分辨率为天线孔径的一半,国外报道的 SAIL 的成像分辨率也采用了同样的估计。由于光波长远远小于微波波长,光学波段的 SAIL 在实施原理方法上与微波 SAR 完全不同。曾经基于几何光学结合衍射的概念研究过 SAIL 的成像分辨率,指出方位向孔径合成的理想成像分辨率按照衍射区域的不同有可能为天线孔径的一半或者天线孔径本身尺度^[4~6]。在所有报道的 SAIL 系统及相关实验中所使用的光学天线都是圆孔径的望远镜系统^[1~4],因此 SAIL 扫描是一维的而光学足趾是圆对称分布的,不同上下位置的目标点的扫描路径及其获得的信息是不同的,这必定产生分辨率不均匀,所以有必要对方位向成像分辨率进行深入研究。事实上也可以想象到分离变量的矩形光学足趾会更加适合于 SAIL 的一维扫描方式,因此本文提出矩形孔径的望远镜天线结构,并且通过分辨率来比较和确认其优越性。

以合成孔径激光成像雷达的点目标激光雷达二维数据收集方程为基础,导出了圆形孔径和矩形孔径望远镜天线 SAIL 的成像点扩展函数解析表达式,分析了理想成像点尺寸及其光学足迹中心偏离、相位二次项历程匹配滤波的失匹、空间采样宽度和周期等的影响。特别注意了圆孔径天线在一维方位向聚焦成像时其足趾二维圆对称方向性函数将被一维截取,导致了坐标比例因子的变化而产生分辨率的降低和变化。得出的结论是矩形孔径函数及其远场变换属于分离变量函数,不仅能产生适合于 SAIL 扫描方式的矩形光学足趾,消除光学足趾的

中心垂直方向上的方位向成像分辨率不均匀及降低现象,而且可以设计最佳的矩形孔径的尺度分别控制 SAIL 光学足趾在方位向及其垂直方向上的尺度,得到大扫描宽度和高方位向分辨率;也研究了距离向成像分辨率并发现,理想分辨率反比于时间采样窗口宽度;也发现了目标和本振的外差延时必须尽量小以克服非线性啁啾和初始光频不稳定性相位误差。此现象都给出了数学判据。在理论分析基础上,本文也给出了缩小尺度 SAIL 的孔径合成实验的成像分辨率解释^[7],证明了所发展理论的准确性。国外 SAIL 的报道集中在时间域和信号处理域,几乎没有空间光学域及分辨率的讨论,具有创新性和基础性。

论文首先给出点目标 SAIL 的方位向成像基本数学分析,然后分别研究圆孔径光学天线 SAIL 的方位向成像分辨率,矩形孔径光学天线 SAIL 的方位向成像分辨率,距离方向成像分辨率,最后给出了理论与先前实验的比较并得出结论。

2 点目标合成孔径激光成像雷达的二维收集数据和成像

先归纳点目标 SAIL 二维数据收集方程,据此给出方位向成像过程的点扩展函数的一般公式。

(1)点目标合成孔径激光成像雷达二维数据收集方程
激光雷达对于第 k 个点目标 (α_k, β_k) 进行二维数据收集,数据可以采用矩阵方式表达, n 为距离方向行数, m 为方位方向列数, $m=0$ 设定为空间和时间采样的原点,以 $t_{m,\text{start}}$ 为时间采样起点,因此二维数据收集方程可以表达为^[4,8]

$$i_k(n, m) = C_k T(\alpha, \beta_k) R(\alpha, \beta_k) \exp \left[j\pi \frac{\alpha^2 + \beta_k^2}{\lambda f_{\text{ft}}} + \Delta\varphi(\alpha, \beta_k) \right] \text{rect} \left(\frac{\alpha}{B} \right) \sum_m \delta \left(\frac{\alpha - \alpha_k}{\Delta \alpha} - m \right) \times \\ \exp \left\{ j \left[2\pi \dot{f} \Delta \tau_{k,m}(t_m - t_{m,\text{start}}) + \frac{\ddot{f}}{2} \Delta \tau_{k,m}(t_m - t_{m,\text{start}})^2 + f(t_{m,\text{start}} - \frac{\Delta \tau_{k,m}}{2}) \Delta \tau_{k,m} \right] \right\} \times \\ W(t_m) \sum_n \delta \left(\frac{t_m - t_{m,\text{start}}}{\Delta T} - n \right), \quad (1)$$

其中 C_k 为与激光发射功率、本振激光功率、光学外差接收灵敏度、发射和接收光学系统结构、自由空间光传输、目标复反射率特性等有关常数。发射激光方向性在物面的分布函数为 $T(\alpha, \beta)$, 光学外差接收方向性在物面的等效分布函数为 $R(\alpha, \beta)$, 剩余空间相位因子为 $\Delta\varphi(\alpha, \beta_k)$, 方位向的空间采样宽度为 B , 采样间隔为 $\Delta\alpha$ 。

定义光学足趾为在目标面上发射光斑和外差有效接收面积的共同作用范围,光学足趾等效曲率半径为 $1/f_{\text{ft}} = 1/f_{\text{t}} + 1/f_{\text{r}} + 1/f_{\text{add}}$ ^[4], 其中 f_{t} 为发射光束本身曲率半径, f_{r} 为接收波面曲率半径, 它们与目标和激光雷达之间的衍射区域有关, f_{add} 为发射光束附加曲率半径, 光学足趾等效曲率半径最终可以表达为

$$f_{ft} = z/K. \quad (2)$$

例如菲涅耳衍射区 $K=2$, 夫琅禾费衍射区 $K=1$ 。

(二维数据收集方程(1)中的时间信号部分将在第6节“距离方向成像分辨率”中讨论和分析。)

(2)合成孔径激光成像雷达的方位向成像点扩展函数为分辨率分析方便起见设目标点在光学足迹中心线上,即 $\alpha_k=0$ 。设物体面上匹配滤波二次项相位为

$$I(x) = F_{\frac{x}{\lambda f_{ft}}} [T(\alpha, \beta_k)] * F_{\frac{x}{\lambda f_{ft}}} [R(\alpha, \beta_k)] * F_{\frac{x}{\lambda f_{ft}}} \left[\exp \left(j\pi \frac{\alpha^2}{\lambda \Delta f_{ft}} \right) \right] * F_{\frac{x}{\lambda f_{ft}}} \left\{ \exp \left[j2\pi \frac{\alpha \Delta S_k}{\lambda f_{ft}} \right] \right\} * F_{\frac{x}{\lambda f_{ft}}} \left[\text{rect} \left(\frac{\alpha}{B} \right) \right] * F_{\frac{x}{\lambda f_{ft}}} \left[\sum_n \delta \left(\frac{t_m - t_{m, \text{start}}}{\Delta T} - n \right) \right]. \quad (4)$$

(4)式卷积第一项和第二项分别为由发射激光方向性和外差接收方向性函数产生的成像点扩展函数,第三项为匹配滤波器失匹影响,第四项为点目标成像中心位置,第五项为空间采样宽度或者成像计算的积分宽度,第六项为周期采样函数。其中匹配滤波器的失匹配因子为

$$\Delta f_{ft} = \frac{f'_{ft} f_{ft}}{f'_{ft} - f_{ft}}. \quad (5)$$

方位向匹配滤波后的成像位置在

$$F_{\frac{x}{\lambda f_{ft}}} \left[\exp \left(j2\pi \frac{\alpha \Delta S_k}{\lambda f'_{ft}} \right) \right] = \lambda f_{ft} \delta \left(x - \frac{f_{ft}}{f'_{ft}} \Delta S_k \right). \quad (6)$$

望远镜结构如图1和图2所示,物镜焦距为

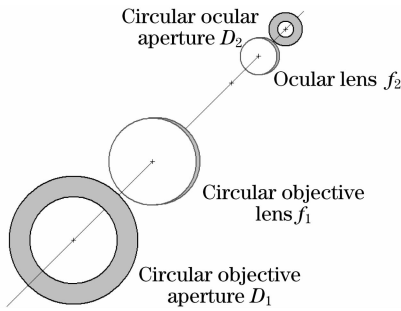


图1 圆孔径望远镜结构

Fig. 1 Structure of a telescope of circular aperture

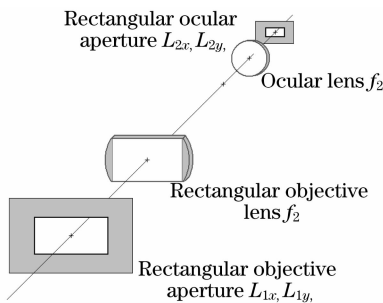


图2 矩形孔径望远镜结构

Fig. 2 Structure of a telescope of rectangular aperture

$$\varphi_{\text{match}}(\alpha) = -j\pi \frac{(\alpha - \Delta S_k)^2}{\lambda f'_{ft}}, \quad (3)$$

其中 ΔS_k 为滤波函数中心位置即成像位置, f'_{ft} 为匹配二次项半径。因此方位向成像为(1)式表达的光电流的方位方向有限空间积分域的傅里叶变换,振幅归一化并采用空间域卷积积分表达,在成像面上点扩展函数为

f_1 , 目镜焦距为 f_2 , 目镜瞳孔面为外差光电探测器面或者发射光束输入面,物镜瞳孔面为望远镜接收孔径面或者发射面,物镜瞳孔面和目镜瞳孔面相互成像,放大倍数为 $M=f_1/f_2$ 。

圆孔径望远镜的物镜和目镜瞳孔均为圆孔,物镜直径为 D_1 时的孔径函数为

$$p_{\text{cyl}}(x, y) = \text{cyl} \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D_1} \right), \quad (7a)$$

因此不论作为接收或者发射其相应的方向性函数在目标面上有^[4-6]

$$\Theta_{\text{cyl}}(\alpha, \beta : z) = \frac{2J_1 \left(\pi \frac{D_1 \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\lambda z} \right)}{\pi \frac{D_1 \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\lambda z}}, \quad (7b)$$

其中主瓣的直径为 $d_0 = 2.44\lambda z/D_1$ 。

矩形孔径接收光学望远镜的主镜入瞳为矩形光阑,即

$$p_{\text{rect}}(x, y) = \text{rect} \left(\frac{x}{L_{1,x}} \right) \text{rect} \left(\frac{y}{L_{1,y}} \right), \quad (8a)$$

其中 $L_{1,x}$ 和 $L_{1,y}$ 分别为矩形光阑的方位向和垂直向边长。同样不论作为接收或者发射其相应的方向性函数在目标面上为

$$\Theta_{\text{rect}}(\alpha, \beta : z) = \text{sinc} \left(\frac{L_{1,x} \alpha}{\lambda z} \right) \text{sinc} \left(\frac{L_{1,y} \beta}{\lambda z} \right). \quad (8b)$$

其中主瓣的零点全宽度为 $d_x = 2\lambda z/L_{1,x}$ 和 $d_y = 2\lambda z/L_{1,y}$ 。

事实上,望远镜作为接收光学天线时需要进行空间二次项相位的补偿^[5],望远镜作为发射光学天线时可以进行控制以产生合适的相位二次项历程^[6],而望远镜同时作为接收天线和发射天线时需要采用双向环路结构分别实施相位补偿和偏置^[9],而二次项相位历程的产生与工作模式有关^[4,8],设定望远镜均符合使用条件。

3 圆孔径光学天线合成孔径激光成像雷达的方位向成像分辨率

图 3 给出了目标面上圆形孔径望远镜的远场足趾情况。先导出圆孔径光学天线 SAIL 的成像点扩展函数, 然后分析成像点尺寸及其影响因素并且给出数学判据。

(1) 成像点扩展函数

望远镜在平面波光学外差接收和平面波激光光束发射的情况下, 最佳设计是接收方向性函数和发射发散度函数相匹配, 即接收和发射直径相同均为 D 。在成像面上点扩展函数表达式(4)中代入各个函数, 可以求得像面上点扩展函数。但是运算中对于二维的艾里斑函数进行一维截取的傅里叶变换没有解析解, 进行近似估算, 通过数值计算结果比较

可以看到在艾里斑半径左右, 二维艾里斑函数的一维剖面函数能够近似表达为

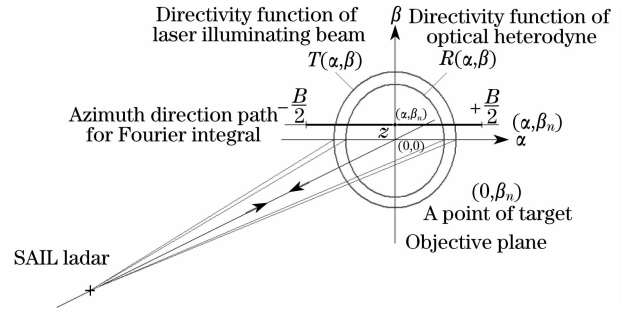


图 3 目标面上圆形孔径望远镜接收和发射方向性函数
Fig. 3 Reception and transmission directivity function on the target plane with a telescope of circular aperture

$$R(\alpha, \beta_k) = \frac{2J_1\left(\pi \frac{D_1 \sqrt{\alpha^2 + \beta_k^2}}{\lambda z}\right)}{\pi \frac{D_1 \sqrt{\alpha^2 + \beta_k^2}}{\lambda z}} \approx \frac{2J_1\left(\pi \frac{D_1 \beta_k}{\lambda z}\right)}{\pi \frac{D_1 \beta_k}{\lambda z}} \operatorname{sinc}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{(1.22 \frac{\lambda z}{D_1})^2 - \beta_k^2}}\right), \quad (9a)$$

其成像面傅里叶变换为

$$F_{\frac{x}{\lambda f_{\text{ft}}}}[R(\alpha, \beta_k)] = \sqrt{(1.22 \frac{\lambda z}{D_1})^2 - \beta_k^2} \frac{2J_1\left(\pi \frac{D_1 \beta_k}{\lambda z}\right)}{\pi \frac{D_1 \beta_k}{\lambda z}} \operatorname{rect}\left[0.8 \frac{x}{z \sqrt{1 - (0.8 \frac{D_1}{\lambda z} \beta_k)^2}} D_r\right]. \quad (9b)$$

因此最终得到圆形孔径天线的 SAIL 成像的忽略常数项的点扩展函数为

$$I_k(x) = \sqrt{(1.22 \frac{\lambda z}{D_r})^2 - \beta_k^2} \left[\frac{2J_1\left(\pi \frac{D_1 \beta_k}{\lambda z}\right)}{\pi \frac{D_1 \beta_k}{\lambda z}} \right]^2 \times \left\{ \left[\operatorname{tri}\left(\frac{x}{\lambda f_{\text{ft}} D}\right) \right] \right\} * \left[\exp\left(-j\pi \frac{x^2}{\lambda f_{\text{ft}}^2 \Delta f_{\text{ft}}}\right) \right] * \left[\delta\left(x - \frac{f_{\text{ft}} \Delta S_k}{f_{\text{ft}}}\right) \right] * \left[\operatorname{sinc}\left(\frac{x B}{\lambda f_{\text{ft}}}\right) \right] * \left[\sum_m \delta\left(\frac{\Delta \alpha x}{\lambda f_{\text{ft}}} - m\right) \right]. \quad (10)$$

(2) 方位向理想成像分辨率

在匹配滤波无失配和无限大窗口的条件下的方位向分辨率称为理想分辨率, 从点扩展函数得到的是三角形剖面分布, 像点直径为

$$d_{\text{azi}}(\beta_k) = \frac{2\lambda f_{\text{ft}} D}{\sqrt{(1.22 \lambda z)^2 - (\beta_k D)^2}}. \quad (11a)$$

考虑运动中心线上的像点尺寸, 代入光学足趾的等效半径可能值, 有

$$d_{\text{azi}}(\beta_k = 0) = \frac{1.6D}{K}, \quad (11b)$$

可见在非涅耳和未琅禾费衍射区中心线上的理想分辨率为 $(0.8 \sim 1.6)D$, 大于微波合成孔径雷达方位向分辨率 $0.5D$ 。而附加发射相位偏置下 ($K > 2$) 有

可能小于微波合成孔径雷达方位向分辨率。

(3) 目标点运动垂直方向位置对于方位向分辨率的影响

目标点在垂直偏离中心线扫描位置 ($\beta_k \neq 0$) 上产生的方位向分辨率影响可以根据(11a)式和(11b)式用扩大因子表达

$$E_p = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\beta_k D}{1.22 \lambda z}\right)^2}}. \quad (12)$$

可见扩大 1.5 倍分辨率尺寸的垂直方向中心偏离为 0.75 艾里半径。

(4) 方向性空间相位二次项匹配滤波的失配效应

由(4)式, 空间相位匹配滤波器的失配效应可以简化表达为

$$I(x) = C \times \left[p(x : r) * \exp\left(-j\pi \frac{x^2}{\lambda f_{it}^2 / \Delta f_{it}}\right) \right], \tag{13}$$

其中 $p(x)$ 为理想成像 PSF, 底宽为 $2r$ 。可以用作图法求得失匹加宽的成像点零点半宽度的近似解析表达式。如果 PSF 脉冲卷积至 x_a 和 $x_a + 2r$ 上, 使得匹配滤波二次项相位因子分别为 $x_a^2 \Delta f_{it} / \lambda f_{it}^2 = s$ 和 $(x_a + r)^2 \Delta f_{it} / \lambda f_{it}^2 = s + 2$, 这时在脉冲底宽内的相位二次项边界具有 2π 相位差, 近似认为积分为零。因此卷积加宽的成像点扩展函数的近似零点半宽度为 $d'_{azi} = x_a + r$, 注意当 $\lambda f_{it}^2 / 2r^2 \Delta f_{it} \leq 1$ 时, 不可能存在 $x_a / r \leq 0$, 最终可求得分辨率尺寸为

$$d'_{azi} = \left\{ \begin{array}{l} d_{azi} \quad \left(\frac{|f'_{it} - f_{it}|}{f_{it}} \leq \frac{d_{azi}}{D_{azi}} \right) \\ D_{azi} \frac{|f'_{it} - f_{it}|}{f_{it}} \quad \left(\frac{|f'_{it} - f_{it}|}{f_{it}} > \frac{d_{azi}}{D_{azi}} \right) \end{array} \right\}, \tag{14}$$

其中 $D_{azi} = 2\lambda f_{it} / d_{azi}$ 。因此克服失匹所要求的匹配滤波器条件为

$$|f'_{it} - f_{it}| \ll d_{azi}^2 / 2\lambda. \tag{15}$$

(5) 方位向空间采样和积分宽度影响

方位向数据收集的空间宽度 B 也就是聚焦成像傅里叶变换的积分宽度, 空间积分带宽的影响等效于基本成像点扩展函数与带宽响应函数

$\text{sinc}(Bx/\lambda f_{it})$ 的卷积。空间带宽等于圆形光学足趾的爱里斑直径 $B = 2.44\lambda z / D$ 时, 可以作为窗口宽度的判据, 即

$$B \geq \frac{2.44\lambda z}{D}. \tag{16}$$

(6) 方位向空间采样周期影响

空间采样间隔以圆形光学足趾爱里斑半径上二次项相位历程有一个 π 变化的距离 $D/2 \times 1.22$ 作判据, 有

$$\Delta\alpha < \frac{D}{2 \times 1.22}. \tag{17}$$

4 矩形孔径光学天线合成孔径激光成像雷达的方位向成像分辨率

图 4 给出了目标面上矩形孔径望远镜的远场足趾情况。先导出矩形孔径光学天线 SAIL 的成像 PSF, 然后分析成像点尺寸及其影响因素并且给出数学判据。

(1) 成像点扩展函数

平面波光学外差接收和平面波激光光束发射时, 最佳设计是接收方向性函数和发射发散度函数匹配, 即 $L_x = L_{r,x} = L_{t,x}$ 和 $L_y = L_{r,y} = L_{t,y}$ 。在成像面上 PSF(4) 式中代入各个函数, 得到忽略常数的 PSF 为

$$I_k(x) = \left[\text{sinc}\left(\frac{L_y \beta_k}{\lambda z}\right) \right]^2 \times \left\{ \text{tri}\left[\frac{x}{L_x f_{it}}\right] * \left[\exp\left(-j\pi \frac{x^2}{\lambda f_{it}^2 / \Delta f_{it}}\right) \right] * \left[\text{sinc}\left(\frac{Bx}{\lambda f_{it}}\right) \right] * \left[\delta\left(x - \frac{f_{it}}{f'_{it}} \Delta S_k\right) \right] * \left[\text{sinc}\left(\frac{x B}{\lambda f_{it}}\right) \right] * \left[\sum_m \delta\left(\frac{\Delta \alpha x}{\lambda f_{it}} - m\right) \right] \right\}. \tag{18}$$

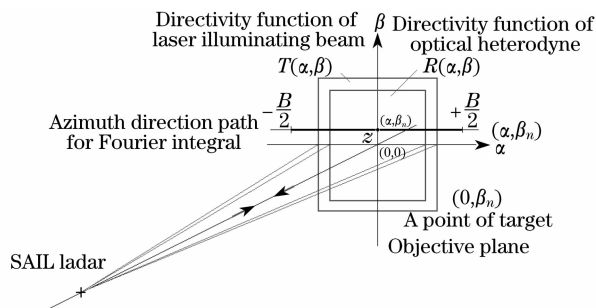


图 4 目标面上矩形孔径望远镜接收和发射方向性函数
Fig. 4 Reception and transmission directivity function on the target plane with a telescope of rectangular aperture

$$d_{azi} = \frac{2L_x f_{it}}{z}, \tag{19}$$

可见目标点在垂直偏离中心线扫描位置 ($\beta_n \neq 0$) 上完全不存在分辨率变化的现象。根据光学足趾的等效曲率半径可能值, 其分辨率尺寸具体为

$$d_{azi} = \frac{2L_x}{K}. \tag{20}$$

可见在非涅耳和夫琅禾费衍射区理想分辨率为 $(1 \sim 2)L_x$, 大于微波合成孔径雷达方位向分辨率 $0.5D$ 。而附加发射相位偏置下 ($K > 2$) 可小于微波合成孔径雷达方位向分辨率。

(3) 方向性匹配滤波的失匹效应

矩形孔径下的方位向二次项相位的匹配滤波的失匹所产生的成像点加宽以及所要求的匹配条件与

(2) 方位向理想成像分辨率

从(18)式可以得到三角形剖面理想像点, 其全宽度尺寸为

圆形孔径下的情况相同。

(4) 方位向采样和空间积分宽度影响

空间带宽等于光学足趾的艾里斑直径 ($B = 2\lambda z/D$) 可以作为窗口宽度的判据

$$B \geq 2\lambda z/D. \quad (21)$$

(5) 方位向空间采样周期影响

空间采样间隔以矩形光学足趾艾里斑半径上二次项相位历程有一个 π 变化的距离 $D/2$ 作判据, 有

$$\Delta\alpha < D/2. \quad (22)$$

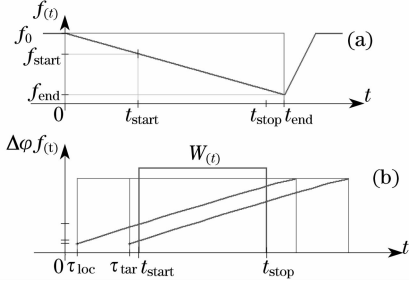


图5 激光频率啁啾过程(a)和回波本振外差信号的采样过程(b)

Fig. 5 Laser frequency chirping (a) and sampling of heterodyned signal (b)

5 距离方向成像分辨率

(1)式的二维数据收集方程的时间项中, $t_m = t - mT_l$ 为第 m 次采样的局域时间, T_l 为激光发射脉冲周期。图5分别表示第 m 个激光脉冲的激光频率啁啾过程, 回波与本振信号外差过程(为简便起见讨论忽略 m)。啁啾从光源触发信号 $t=0$ 开始到 t_{end} , 即发射激光啁啾的宽度为 $T_{laser} = t_{end}$ 。光源输出的同步触发信号时间即外差信号的采集开始时间为 t_{start} , 采样从 t_{start} 到 t_{stop} 。设 $\tau_{tar,k}$ 为第 k 个点目标的回波信号延时, τ_{loc} 为本振激光延时, 则相对延时为

$$\Delta\tau_k = \tau_{tar,k} - \tau_{loc} = \frac{2}{c}(z_k - z_{loc}), \quad (23)$$

其中 z_k 为该目标点距离, z_{loc} 为本振臂长。该过程需要满足条件: $t_{start} \geq \tau_{tar,k} \geq \tau_{loc}$ 和 $t_{stop} \leq \tau_{loc} + T_{laser}$ 。

(1)式中时间表达式复数第一项为光学外差产生的啁啾差频时间相位信号, 发射激光的频率啁啾速率为 \dot{f} , 设计依据为 $\dot{f} = c/2T_{chirp} \Delta L$, 其中 ΔL 为所需(单边)分辨率, T_{chirp} 为所需激光啁啾时间。第二项为二次非线性啁啾产生的时间二次相位项即散焦项, 第三项为同步采样开始时刻上的光频初始相位, 可以采用 HCN 吸收盒进行频率同步从而降低初始相位波动, 要求其远小于 $\pi/4$, 即有

$$\Delta\tau_k \ll \frac{1}{4\delta f_{start}}, \quad (24)$$

其中 δf_{start} 为同步频率不稳定性。

时间采样周期为 ΔT 。时间采样窗口函数为

$$W(t) = \text{rect}\left(\frac{t - C_s}{T_s}\right), \quad (25)$$

其中宽度为 $T_s = t_{stop} - t_{start}$, 中心位置在 $C_s = (t_{start} + t_{stop})/2$ 。

对于 SAIL 二维数据收集方程中的时间表达式进行傅里叶变换可以得到点目标距离聚焦成像。但是距离方向存在非线性啁啾相位误差的影响, 已报道的减弱啁啾非线性的方法都采用附加参考外差通道进行模拟或者数字补偿的方法^[1,2], 这些都可以归结为对目标和本振的相对延时的时间压缩, 即等效于非线性啁啾的匹配滤波。考虑到傅里叶变换在时间频率成像面(ξ)上产生距离像, 时间频率 ξ 到空间成像坐标的变换为

$$\xi = \frac{2\dot{f}}{c}z, \quad (26)$$

因此忽略常数的距离聚焦像的 PSF 为

$$I_n(z) = \left[\text{sinc}\left(\frac{2\dot{f}T_s}{c}z\right) \exp(-j2\pi \frac{2\dot{f}C_s}{c}z) \right] * \left[\delta(z - z_k) \exp(-j2\pi \frac{2\dot{f}t_{start}}{c}z) \right] * \left[\exp\left(-j\pi \frac{z^2}{\left(\frac{c}{2\dot{f}}\right)^2 \dot{f}\Delta\tau_k}\right) \right] * \left[\exp(-j2\pi \frac{2\dot{f}t_{start}}{c}z) \sum_n \delta\left(\frac{2\dot{f}\Delta T}{c}z - n\right) \right]. \quad (27)$$

其中卷积第一项为由采样宽度决定的距离向理想成像 PSF, 像点直径为

$$d_{range} = c/\dot{f}T_s. \quad (28)$$

第二项为距离像点位置, 表明成像点的距离位置在

$$z_k = c\Delta\tau_k/2. \quad (29)$$

第三项为非线性啁啾二次项像点扩展因子, 相当于

非线性啁啾的匹配滤波的失匹, 像点扩展因子可以按照同样于(14)式的近似数学方法得到

$$d'_{range} = \begin{cases} d_{range}, & |j\Delta\tau_k| \leq \frac{4}{T_s^2} \\ \frac{T_s^2 |j\Delta\tau_k|}{4} d_{range}, & |j\Delta\tau_k| > \frac{4}{T_s^2} \end{cases}, \quad (30)$$

因此可以忽略非线性啁啾相位误差影响的条件为

$$\Delta\tau_k \ll \frac{4}{|\dot{f}|T_s^2}. \quad (31)$$

第四项为采样周期因子影响,在分析分辨率时,可以假定 ΔT 足够小而符合采样定律而忽略不计,这时应当小于外差信号周期,即

$$\Delta T < \frac{1}{2f\Delta\tau_k}. \quad (32)$$

6 结 论

由分析可见,(1)在发射光束和接收方向性匹配条件下,方位向成像分辨率的点扩展函数为三角形剖面。对于圆孔径天线由于成像一维傅里叶积分是从二维圆对称方向性分布函数中截取的,像点具有 0.8 倍缩小因子,而且目标点中心位置偏离将使得像点尺度增加,增大量与相对距离向位置约成平方正比,具有判据即中心偏离 0.75 艾里半径时像点增大 1.5 倍。而矩形孔径天线目标点在垂直偏离中心线扫描位置上完全不存在分辨率变化的现象。(2)圆孔径天线的目标运动中心线上的理想分辨率(夫琅禾费衍射区-菲涅耳衍射区)为 $(0.8 \sim 1.6)D$,矩形孔径天线的理想分辨率(夫琅和费衍射区-菲涅耳衍射区)为 $(1 \sim 2)L_x$,均大于微波 SAR 方位向理想成像点尺度 $0.5D$ 。在附加发射相位偏置下,都有可能小于微波合 SAR 方位向分辨率。(3)方位向相位二次项匹配滤波的不匹配将降低分辨率,像点尺度增大正比于失匹量,无影响所需的失匹量为 $|f'_{ft} - f_{ft}| \ll d_{azi}^2/2\lambda$;(4)方位向的采样宽度即聚焦积分宽度应当以艾里斑直径为估算基础,对于圆孔径天线要求 $B \geq 2.44\lambda z/D$,对于矩形孔径天线要求 $B \geq 2\lambda z/L_x$,否则将出现明显的像点尺度增大和旁斑增多增大;(5)理想距离向分辨率即距离向像点尺度反比于实际时间采样窗口宽度即 $d_{range} = c/T_s \dot{f}$;(6)为了克服非线性啁啾和初始光频相位误差的影响,目标和本振的外差延时必须同时满足 $\Delta\tau_k \ll$

$$\frac{4}{|\dot{f}|T_s^2} \text{ 和 } \Delta\tau_k \ll \frac{1}{4\delta f_{start}}.$$

从结论中应当注意 SAIL 的合适的工作模式为,运动垂直方向的扫描宽度应当小于 0.75 光学足趾艾里直径(而不是直接的艾里直径);方位向采样宽度应大于艾里直径。更加重要的结论是矩形孔径天线具有优越性,其可以产生适合于合成孔径激光成像雷达扫描方式的矩形光学足趾,能够消除光学足趾的中心垂直方向上的方位向成像分辨率不均匀

及降低现象,可以设计最佳的矩形孔径的尺度分别控制 SAIL 光学足趾在方位向及其垂直方向上的尺度,得到大扫描宽度和高方位向分辨率。同样有意义的结论为目标和本振的外差延时必须尽量小以克服非线性啁啾和初始光频不稳定性相位误差。

先前完成了一种缩小尺度的合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验^[9],发射和接收口径直径均为 1 mm,作用距离为 3.2 m 接近夫琅禾费衍射,发射和接收艾里斑直径约为 7.8 mm,发射波面曲率半径为 3.2 m,由于没有接收望远镜进行波面相位补偿因此探测器上的回波波面的曲率半径也为 3.2 m,由分析可知该系统的理想方位向分辨率应为 0.8 mm,但是由于无补偿的二次项相位波面的外差探测效率的降低限制了方位向的采样和积分宽度约至 3.2 mm,使得分辨率尺度增大至 2 mm 以上并且出现了旁斑,这一现象与 PSF 分析一致。当然分辨率降低和旁斑产生与实验系统的其它相位误差有关。进一步的二维成像实验结果也符合分辨率分析^[10],事实上点目标的点扩展函数的实验测量也就是 SAIL 系统的成像分辨率的标定。

除了圆形和矩形孔径外,也可采用椭圆等孔径。发射光束可采用圆对称高斯光束,也可采用椭圆高斯光束。所有的组合都可以使用该分析方法,所得的数学结果基本相同。

参 考 文 献

- 1 M. Bashkansky, R. L. Lucke, F. Funk et al.. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 2 S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell et al.. Synthetic-aperture imaging lidar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
- 3 J. Ricklin, M. Dierking, S. Fuhrer et al.. Synthetic aperture lidar for tactical imaging[C]. *DARPA Strategic Technology Office*.
- 4 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar[C]. *Proc. SPIE*, 2008, **7094**: 7094F1~F13
- 5 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (I): Defocused and phase-biased telescope for reception antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 997~1200
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 997~1000
- 6 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (II): Spatial phase biased telescope for transmitting antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1197~1200
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(II): 空间相位偏置发射望远镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1197~1200
- 7 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (III): Circulated duplex telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1405~1410
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(III): 双向环路发射接收望远镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1405~1410

- 8 Liu Liren, Synteric aperture laser imaging lidar (IV): Unified operation mode and two-dimensional data collection equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 1~6
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(IV): 统一工作模式和二维数据收集方程[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 1~6
- 9 Zhou YU, Luan Zhu, Sun Jianfeng *et al.*. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2446~2448

- 周煜, 孙建锋, 栾竹等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验[J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2446~2448
- 10 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. 2D imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2):
周煜, 许楠, 栾竹等. 实验室合成孔径激光雷达点目标二维成像实验[J]. 光学学报, 2009, **29**(2):

***Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》) 2009 年“Nanophotonics”和 “Digital and Computer-Generated Holography” 专题征稿启事**

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》) 计划于 2009 年 10 月在正刊上推出“Nanophotonics”(“纳米光子学”)专题, 特向国内外广大读者以及作者征集该方面原创性的研究论文。征稿范围包括:

- Metamaterials; negative index, cloaking and nonlinear phenomena
- Materials synthesis; molecular architectures for photonic applications, eg. carbon nanotubes, DNA and dendrimers
- Nanofabrication techniques; eg. multiphoton polymerization and nanoimprint technology
- Nanocharacterization methods and instrumentation; Near-field techniques, super-resolution and high temporal resolution
- Nanosensors; resonators and field enhancement strategies for improved sensitivity
- Photonic crystals; spatial and temporal dispersion phenomena with applications and nonlinear effects
- Plasmonics; localized and propagating surface modes, metalodielectrics, fishnet structures
- Quantum confined structures; quantum dots to quantum wells with applications to sources and detectors
- Nanostructures for energy; Dye-sensitization, plasmonic enhancement, organic and carbon based nanomaterials, quantum structures

Feature Editors:

Joseph W. Haus, Director

Electro-Optics Program, University of Dayton, Dayton, USA

Yiping Cui

Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing, China

截稿日期: 2009 年 5 月 30 日

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》) 计划于 2009 年 12 月在正刊上推出“Digital and Computer-Generated Holography”(“数字与计算全息”)专题, 特向国内外广大读者以及作者征集该方面原创性的研究论文。征稿范围包括:

- Digital holography theory and systems
- Phase unwrapping
- Computer generated holograms
- Spatial light modulators for holography
- Holographic optical elements
- 2D and 3D pattern recognition
- Three-dimensional imaging and processing
- Three-dimensional display
- 2D-3D content conversion
- Shape and deformation measurement
- Holographic imaging and microscopy
- Holographic Optical Micro-Manipulation

Feature Editor:

Ting-Chung Poon, Ph. D., Professor

Bradley Department of Electrical and Computer Engineering

Virginia Tech

Blacksburg, Virginia 24061 USA

截稿日期: 2009 年 7 月 15 日

投稿方式以及格式: 可直接将稿件电子版发至邮箱: col@mail.shnc.ac.cn(主题标明“专题(上述两个专题的具体名称)投稿”), 或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission, 备注中写明具体专题名称, 推荐用此方式投稿), 详情请参见《中国光学快报》网站: <http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿, 其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shnc.ac.cn 询问。