

文章编号: 0253-2239(2010)07-2123-07

合成孔径激光雷达成像之匹配滤波器

吴 谨

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

摘要 基于光学衍射理论,探讨了采用准单色光照明的条带模式合成孔径激光雷达(SAL)的成像过程,给出了几种情况下,方位合成孔径成像匹配滤波器的解析表达形式及相应的成像分辨率。结果表明,条带模式 SAL 方位成像匹配滤波器的表达式除了与激光发射波长、成像距离和雷达坐标有关外,还与发射光束特性、接收光路结构参数等有关。因此,在实验室采用高斯光束作为探测光源进行 SAL 演示成像时,目标放在发射光束光腰处、瑞利范围之内、多倍瑞利范围之外等不同位置所需要的方位成像匹配滤波器有所不同。为了获得高的合成孔径成像分辨率,目标应置于多倍瑞利范围之外。

关键词 遥感;合成孔径激光雷达(SAL);匹配滤波器;高斯光束;瑞利范围

中图分类号 TN958 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2123

Matched Filter in Synthetic Aperture Ladar Imaging

Wu Jin

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The imaging process of a strip-map mode synthetic aperture ladar (SAL) utilizing quasi-monochromatic light illumination is investigated based on optics diffraction theory. The theoretical expressions of the matched filters and the corresponding azimuth resolutions for synthetic aperture imaging under several conditions are given. Results show that the matched filter in a strip-map mode SAL is not only expressed in transmitting wavelength, target distance and SAL azimuth coordinate, but also coupled with the transmitting beam and the configuration of the receiving optics. As a result, for a laboratory-scale SAL demonstration system utilizing Gaussian beam as the detecting light, the expressions of the matched filter for azimuth synthetic aperture imaging vary slightly as the target plane is positioned at the beam waist, inside Rayleigh range or outside multiple Rayleigh range of the transmitting beam. It is suggested that the target should be placed outside the multiple Rayleigh range in order to obtain the high azimuth resolution.

Key words remote sensing; synthetic aperture ladar (SAL); matched filter; Gaussian beam; Rayleigh range

1 引 言

合成孔径激光雷达(SAL)是合成孔径技术与激光技术相结合的高分辨率成像激光雷达。2006年,美国宣称机载 SAL 成像演示成功,取得了里程碑式的进展。受此鼓舞,国内不少研究单位都表现出了浓厚的兴趣,开展了一系列理论与实验演示研究工作^[1~8]。其中,中国科学院上海光学精密机械研究所刘立人教授基于光学衍射理论,对 SAL 的成像分辨率、系统设计等给出了许多基础性的建议^[1~5]。

在 SAL 成像系统中,方位向的高分辨率是通过合成孔径的方式获得的。通过对方位向的采样数据用匹配滤波器进行滤波,实现对目标的方位高分辨。因此,匹配滤波器的选择是重要的,合适的匹配滤波器有助于获得良好的方位向合成孔径成像分辨率。

在一般的合成孔径雷达(SAR)教材中,对于 SAR 成像的分析,常采用“点发射点接收”的模型,即不考虑发射/接收口径尺寸的影响,因为目标距离较远,收发组件与目标之间容易满足夫琅禾费远场

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-09-24

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z107)资助课题。

作者简介: 吴 谨(1965—),男,博士,研究员,主要从事脉冲气体激光器及合成孔径激光雷达等方面的研究。

E-mail: jwu909@263.net

近似条件。这种考虑是有道理的,匹配滤波器也因此有相对简单的形式。然而,在 SAL 成像实验室演示系统中,通常目标距离很近,与发射口径尺寸相比,并不能总是满足夫琅禾费远场近似条件,这时,“点发射点接收”条件不再满足。分析表明,这时的匹配滤波器将与多种因素有关。

考虑到 SAL 实验室近距离成像的需要,本文从衍射光学的角度,对条带模式 SAL 成像系统的匹配滤波器做出分析,并给出几种情况下匹配滤波器的具体表达形式。

2 准单色光衍射方程

SAL 成像一般采用准单色线性调频波,其光场表达式如下

$$U(x, y, z, t) = A(x, y, z) \exp[-j(2\pi f_0 t + \pi f t^2 + \phi_0)], \quad |t| \leq \tau_{\text{pul}}/2 \quad (1)$$

式中 $A(x, y, z)$ 为光场振幅, f_0 为载波频率, f 为线性调频频率, ϕ_0 为光场初位相, τ_{pul} 为光场持续时间(脉冲宽度)。

准单色光要求

$$f\tau_{\text{pul}} \ll f_0, \quad (2)$$

对于满足(1),(2)式的准单色光,忽略大气影响,其近轴衍射方程可由下式计算^[9]:

$$U'(P_0, t) = \frac{1}{j\lambda_0 L_0} \iint_S U(P, t - L/c) dx dy, \quad (3)$$

式中 $U'(P_0, t)$ 为目标平面 $P_0(x_0, y_0)$ 点的光场,载波波长 $\lambda_0 = c/f_0$, L_0 为发射口径与目标平面的中心距, L 为目标平面点 $P_0(x_0, y_0)$ 与发射口径点 $P(x, y)$ 之间的距离,积分是对发射口径 S 进行。在激光雷达中,(3)式可表示正下视 SAL 的几何关系,如图 1 所示。

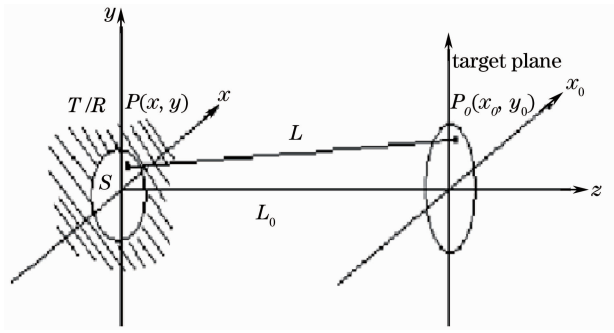


图 1 正下视合成孔径激光雷达几何关系图

Fig. 1 Geometry of down-looking SAL

根据(3)式,对于正侧视 SAL,也可建立如图 2 所示的坐标系。图 2 中,设有 3 个坐标系, xy 坐标系为主坐标系, $x'o'y'$ 为雷达孔径平面坐标系, $x_0o_0y_0$ 为目标平面坐标系,目标平面的 x_0 轴与主坐标系 x 轴平行, y_0 轴在主坐标系 yo 平面内,且与 z 轴成 ϕ 角(正侧视时 $\phi = 45^\circ$)。雷达采用收发合置方式,在主坐标系中,沿 x 轴运动,运动速度为 V ,孔径中心坐标为 $o'(x_m, 0)$ 。

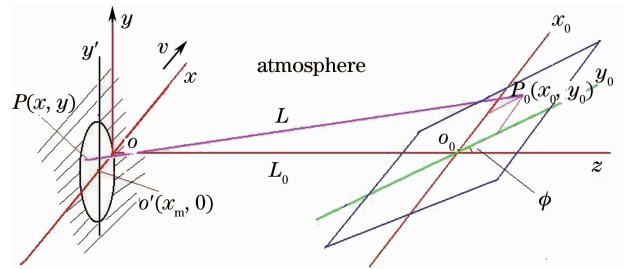


图 2 正侧视合成孔径激光雷达几何图

Fig. 2 Geometry of side-looking SAL

假设在目标平面坐标系中,目标点坐标为 $P_0(x_0, y_0)$,则该目标点 P_0 在主坐标系的坐标为 $(x_0, y_0 \sin \phi, L_0 + y_0 \cos \phi)$,其中, L_0 为目标平面原点 o_0 距主坐标系原点 o 之间的距离。

在主坐标系中,孔径上某点 $P(x, y, 0)$ 距目标点 P_0 的距离为

$$L(x, y; x_0, y_0) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0 \sin \phi)^2 + (y_0 \cos \phi)^2}. \quad (4)$$

在雷达孔径坐标系 $x'o'y'$ 中,孔径上 P 点坐标为 (x', y') ,则有

$$x' = x - x_m; \quad y' = y. \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式得到

$$L(x, y; x_0, y_0) = L(x', y'; x_0, y_0) = \sqrt{(x' + x_m - x_0)^2 + (y' - y_0 \sin \phi)^2 + (L_0 + y_0 \cos \phi)^2} \approx L_0 \left[1 + \frac{(x' + x_m - x_0)^2 + y'^2 - 2y'_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2L_0^2} \right]. \quad (6)$$

如果引入 $U_0(x', y', t)$ 表示发射光波分布(在 $x'o'y'$ 坐标系); $U_r(x'', y'', t)$ 表示接收光波分布(在 $x'o'y'$ 坐标系); $U'_0(x_0, y_0, t)$ 表示目标平面入射光波分布(在目标平面 $x_0o_0y_0$ 坐标系); $U_r(x_0, y_0, t)$ 表示目标平面反射光波分布(在目标平面 $x_0o_0y_0$ 坐标系); $\tilde{T}(x_0, y_0)$ 表示目标平面目标反射系数(在目标平面 $x_0o_0y_0$ 坐标系)。

则依据(3)式,接收口径上点 $P(x'', y'')$ 接收到的光场为

$$U_r(x'', y'', t) = \left(\frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 \cdot \iint dx_0 dy_0 \cdot \iint dx' dy' \cdot U_0 \left[x', y', t - \frac{L(x'', y''; x_0, y_0)}{c} - \frac{L(x', y'; x_0, y_0)}{c} \right] \cdot \tilde{T}(x_0, y_0), \quad (7)$$

其中,包含对发射孔径与目标平面的两次积分(忽略了与成像无关的常数倾斜因子)。

3 外差探测

(7)式只计算了接收口径表面的光场,由于光波频率很高,光场难以直接测量。对光场振幅与相位的探测一般采用间接测量,即外差探测。

从接收口径表面到外差探测器表面,一般还需要经过一些光学系统,最简单的光学系统是一个聚焦透镜,如报道成功实现 SAL 成像演示的文献[10, 11]中的装置,都是通过透镜聚焦后耦合进入光纤,再与本征信号进行外差,如图 3 所示。

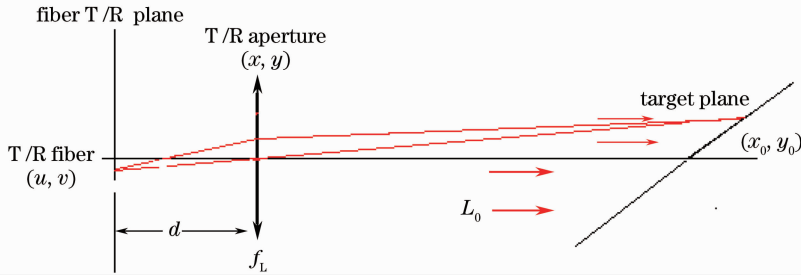


图 3 光纤收发光路图

Fig. 3 Optical path of fiber transmitting/receiving optics

这时,汇聚平面(fiber T/R plane)上的光场近似为

$$U(u, v, t) = \frac{1}{j\lambda_0 d} \iint dx'' dy'' \cdot U_r \left[x'', y'', t - \frac{L(x'', y''; u, v)}{c} \right] \cdot \exp \left[-\frac{j\pi}{\lambda_0 f_L} (x''^2 + y''^2) \right]. \quad (8)$$

(8)式的积分在接收孔径平面进行,式中 f_L 为收发透镜(T/R aperture)焦距, (u, v) 为汇聚平面坐标, (x'', y'') 为接收口径平面坐标。

为简单,对发射孔径发射的激光,考虑振幅为常数的最简单线性调频波,表达式如下

$$U_0(x, y, t) = A \exp[-j(2\pi f_0 t + \pi f t^2 + \phi_{s0})], \quad |t| \leq \tau_{\text{pul}}/2, \quad (9)$$

本征信号通过分离发射信号获得,并在时间上引入参考时间延迟 t_0 , 即

$$U_L(u, v, t) = A_L \exp[-j(2\pi f_0 (t - t_0) + \pi f (t - t_0)^2 + \phi'_{s0})], \quad |t - t_0| \leq \tau_{\text{pul}}/2, \quad (10)$$

则外差信号为

$$r(x_m, t) = \iint dudv U(u, v, t) U_L^*(u, v, t), \quad (11)$$

(11)式表示雷达在 x_m 位置时,获得的外差信号。所谓成像,即是利用获得的 $r(x_m, t)$ 数据,反演求出 $\tilde{T}(x_0, y_0)$ 。

4 SAL 成像

将(7)~(10)式代入(11)式,考虑到近轴近似,整理得到

$$r(x_m, t) = AA_L \frac{1}{j\lambda_0 d} \left(\frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 \iint dudv \iint dx'' dy'' \cdot \exp \left[-\frac{j\pi}{\lambda_0 f_L} (x''^2 + y''^2) \right] \cdot \iint dx_0 dy_0 \cdot \iint dx' dy' \cdot \exp \left\{ -j \left[2\pi f_0 \left[t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{(x'' - u)^2 + (y'' - v)^2}{2dc} - \frac{(x'' + x_m - x_0)^2 + y''^2 - 2y''y_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \sin \phi}{2dL_0} - \frac{(x' + x_m - x_0)^2 + y'^2 - 2y'y_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2cL_0} \right] \right. \right. \\ \left. \left. + \pi f \left[2t - t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{(x'' - u)^2 + (y'' - v)^2}{2dc} - \frac{(x'' + x_m - x_0)^2 + y''^2 - 2y''y_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2cL_0} \right] \right\} \right.$$

$$\left. \frac{(x' + x_m - x_0)^2 + y'^2 - 2y'y_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2cL_0} \right] \cdot$$

$$\left[t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{(x'' - u)^2 + (y'' - v)^2}{2dc} - \frac{(x'' + x_m - x_0)^2 + y''^2 - 2y''y_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2cL_0} - \frac{(x' + x_m - x_0)^2 + y'^2 - 2y'y_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2cL_0} + \phi_{s_0} - \phi'_{s_0} \right] \tilde{T}(x_0, y_0). \quad (12)$$

从(12)式可以看出,对于调频项,起决定作用的是 $L_0 y_0 \cos \phi$,其他坐标值的贡献可以忽略。另外,如果不考虑接收口径的汇聚,发射口径与接收口径对外差信号的贡献是完全对称的。不过,这种对称性由于接收口径汇聚功能的存在而改变。

从(12)式还可以看出,外差信号的相位是时间的一次函数,其频率(中频)大小主要与调频频率、目标距离及目标平面纵坐标有关。

考虑到透镜成像公式

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{L_0} = \frac{1}{f_L}, \quad (13)$$

以及为准单色光近似,(12)式对接收口径的积分($dx''dy''$)可积。可见,当汇聚平面、接收透镜、目标平面三者之间满足几何光学物象关系(13)式时,目标的回波信号满足夫琅禾费远场近似条件,即“点接收”方式。实际SAL成像系统中, $L_0 \gg d, d \approx f_L$ 。

为计算简单,假设收发孔径为方形(圆形反射孔径的处理参考文献[5])。为了区分,虽然是收发合置,但是也假设发射孔径大小为 $2a_{sx} \times 2a_{sy}$,接收孔径为 $2a_{rx} \times 2a_{ry}$ 。先对接收孔径积分,得到

$$r(x_m, t) = AA_L \frac{1}{j\lambda_0 d} \left(\frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 \iint dudv \cdot \iint dx_0 dy_0 \cdot \iint dx' dy' \cdot$$

$$\exp \left\{ -j \left[2\pi f_0 \left(t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{u^2 + v^2}{2dc} - \frac{(x_m - x_0)^2 + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi - \frac{(x' + x_m - x_0)^2 + y'^2 - 2y'y_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2cL_0}} \right) + \right. \right.$$

$$\left. \pi f \left(2t - t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{2y_0 \cos \phi}{c} \right) \left(t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{2y_0 \cos \phi}{c} \right) + \phi_{s_0} - \phi'_{s_0} \right] \cdot$$

$$\tilde{T}(x_0, y_0) 4a_{rx} a_{ry} \operatorname{sinc} \left[\frac{2a_{rx}}{\lambda_0} \left(\frac{u}{d} + \frac{x_m - x_0}{L_0} \right) \right] \operatorname{sinc} \left[\frac{2a_{ry}}{\lambda_0} \left(\frac{v}{d} + \frac{y_0 \sin \phi}{L_0} \right) \right] \right\}. \quad (14)$$

在(14)式中,可以发现,两个 sinc 函数峰值位置实际上表明了几何光学的倒像关系,即

$$\frac{u}{d} + \frac{x_m - x_0}{L_0} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{v}{d} + \frac{y_0 \sin \phi}{L_0} = 0, \quad (16)$$

就取倒像关系(即 sinc 函数峰值),整理(14)式得到

$$r(x_m, t) = 4a_{rx} a_{ry} AA_L \frac{1}{j\lambda_0 d} \left(\frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 A_{uv} \iint dx_0 dy_0 \cdot$$

$$\exp \left\{ -j \left[2\pi f_0 \left(t_0 - d/c - 2L_0/c - d/L_0 - \frac{(x_m - x_0)^2 + (y_0 \sin \phi)^2}{2cL_0} - \frac{(x_m - x_0)^2 + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2cL_0} \right) + \right. \right.$$

$$\left. \pi f \left(2t - t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{2y_0 \cos \phi}{c} \right) \left(t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{2y_0 \cos \phi}{c} \right) + \phi_{s_0} - \phi'_{s_0} \right] \cdot$$

$$\tilde{T}(x_0, y_0) \cdot \iint dx' dy' \exp \left\{ -j \left[2\pi f_0 \left[-\frac{(x' + x_m - x_0)^2 + y'^2 - 2y'y_0 \sin \phi + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{2cL_0} \right] \right] \right\}. \quad (17)$$

式中 $A_{uv} = \iint dudv$ 表示汇聚光斑面积。

至此,可以发现,目标与汇聚平面物象关系的应用使对接收口径的积分满足夫琅禾费远场近似条

件,倒像关系的应用使汇聚平面的积分更加简化。

(17)式是SAL工作于条带模式下,外差探测器输出信号的数据方程,对方程进行距离压缩、方位

匹配滤波,即可获得 SAL 成像。

5 匹配滤波器分析

SAL 成像的一个基本步骤就是方位向的匹配滤波。匹配滤波器的选择合适与否直接影响方位向的成像分辨率。下面将就几种情况下的匹配滤波器进行分析。

(17)式中,对于发射口径的积分 $dx' dy'$,根据

$$r(x_m, t) = 16 \cdot \tau_{\text{pul}} a_{\text{sx}} a_{\text{sy}} a_{\text{rx}} a_{\text{ry}} A A_L \frac{1}{j\lambda_0 d} \left(\frac{1}{j\lambda_0 L_0} \right)^2 A_{\text{uv}} \iint dx_0 dy_0 \cdot \exp \left\{ -j \left[2\pi f_0 \left(t_0 - d/c - 2L_0/c - d/L_0 \frac{(x_m - x_0)^2 + (y_0 \sin \phi)^2}{2cL_0} - \frac{(x_m - x_0)^2 + y_0^2 + 2L_0 y_0 \cos \phi}{cL_0} \right) + \pi f \left(2t - t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{2y_0 \cos \phi}{c} \right) \left(t_0 - d/c - 2L_0/c - \frac{2y_0 \cos \phi}{c} \right) + \phi_{s_0} - \phi'_{s_0} \right] \right\} \cdot \tilde{T}(x_0, y_0) \text{sinc} \left[\frac{2a_{\text{sx}}}{\lambda_0 L_0} (x_m - x_0) \right] \text{sinc} \left(\frac{2a_{\text{sy}}}{\lambda_0 L_0} y_0 \sin \phi \right). \quad (18)$$

从(18)式可以知道,当目标区域在 sinc 函数的主极大范围内时,对应的方位向匹配滤波器可以简单表达为

$$h(x_m) = \exp \left\{ -j2\pi f_0 \left[\frac{x_m^2}{cL_0} \left(\frac{d}{2L_0} + 1 \right) \right] \right\}. \quad (19)$$

采用(19)式的匹配滤波器,可得到输出图像的方向向分辨率为

$$\delta_x = \frac{a_{\text{sx}}}{d/2L_0 + 1}. \quad (20)$$

由(19),(20)式可见,匹配滤波器与方位向分辨率均与目标距离及汇聚平面位置有关,一般 $L_0 \gg d$, (19),(20)式可近似为熟知的结论与表达式。

5.2 菲涅耳深区

从上面的推导过程可以看出,获得(20)式表达的图像方位向分辨率的条件是发射光束至目标平面的传播以及自目标平面的回波均应该满足夫琅禾费远场近似条件,所谓的“点发射点接收”模式双程衍射。当光场的传播不满足夫琅禾费远场近似条件时,则不能获得(20)式表达的图像分辨率。

例如,当发射光与目标之间的传播处于菲涅耳深区时,发射光在目标平面的场分布不过是发射孔径在目标平面的几何投影,即

$$U'_0(x_0, y_0, t) = A \cdot \exp(-jkL_0) \text{rect} \left(\frac{x_0 - x_m}{a_{\text{sx}}} \right) \text{rect} \left(\frac{y_0 \sin \phi}{a_{\text{sy}}} \right) \cdot \exp[-j(2\pi f_0 t + \pi f t^2 + \phi_{s_0})]. \quad (21)$$

在这种情况下,采用上面同样的推导,可得对应的方

发射口径和目标距离的关系,可分为3种:瑞利-索末菲衍射区、菲涅耳衍射区和夫琅禾费衍射区^[1],其中前两种情况下,该衍射积分没有解析解。

5.1 夫琅禾费区

考虑夫琅禾费区时,(17)式与发射口径坐标 (x', y') 有关二次项可以忽略,对发射口径的积分有解析解,这时(17)式积分后变为

位向匹配滤波器及方位向分辨率分别表达为

$$h(x_m) = \exp \left\{ -j2\pi f_0 \left[\frac{x_m^2}{cL_0} \left(\frac{d}{2L_0} + \frac{1}{2} \right) \right] \right\}, \quad (22)$$

$$\delta_x = \frac{2a_{\text{sx}}}{d/L_0 + 1}. \quad (23)$$

对比(23)与(20)两式可知,菲涅耳深区时,方位向合成孔径后的分辨率是“点发射”模式的2倍。这是因为,虽然光束仍是一去一回双程传输,但只有回程传播贡献二次相位因子,所以合成孔径后的图像分辨率降低了。换句话说,合成孔径高分辨率的实现是基于电磁波的远场衍射特性。

5.3 高斯发射光束

上面的推导是以平面波作为例子进行的,平面波振幅为常数,数学处理简单有解析解。从上面的分析也可以看出,为获得高分辨率,应当获得双程衍射。但是,在收发合置 SAL 系统中,对发射口径与接收口径的要求是相互矛盾的:对发射光束,要求发射口径小,以实现“点发射”;对接收光束,要求大口径以获得良好的信噪比。这种矛盾要求在近距离下,用平面波是不好解决的。好在严格的平面波并不存在,采用高斯光束作为发射光则解决了这个矛盾,因为高斯光束是“自衍射”的光束。自由传播的单色高斯光束光场分布可表示为^[12]

$$U_0(x, y, t) = \frac{A}{W(z)} \cdot \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{W^2(z)} \right) \cdot \exp \left\{ j \left[2\pi \left(z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} \right) - \arctan \frac{\lambda_0 z}{\pi w_0^2} \right] \right\}. \quad (24)$$

式中

$$W(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda_0 z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (25)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda_0 z} \right)^2 \right], \quad (26)$$

式中 $z=0$ 的位置取在光斑半径最小处(光腰处)。

当发射光束采用线性调频的准单色高斯光束时,一般发射口径要求其上的高斯光束光斑直径的至少二倍^[4],此时,发射光至目标平面的传播可以近似采用自由传播(24)式。这样,在图 2 所示主坐标系中,雷达在 x_m 位置时,目标平面的入射光场可表达为

$$U'_0(x_0, y_0, t) = \frac{A}{W(L_0 - z_0)} \cdot \exp \left[- \frac{(x_0 - x_m)^2 + (y_0 \sin \phi)^2}{W^2(L_0 - z_0)} \right] \cdot \exp \left\{ \frac{2j\pi \left[\frac{(x_0 - x_m)^2 + (y_0 \sin \phi)^2}{2R(L_0 - z_0)} \right]}{\lambda_0} \right\} \cdot \exp[-j(2\pi f_0 t + \pi f t^2 + \phi_{s0})], \quad |t| \leq \tau_{\text{pul}}/2. \quad (27)$$

在(27)式中,只保留了与合成孔径成像有关的部分,略去了其他与合成孔径成像无关的相位因子, z_0 为主坐标系中发射口径发射的高斯光束光腰位置。

采用同样的推导,可得到此时的方位向匹配滤波器(虚部)为

$$h(x_m) = \exp \left\{ -j2\pi f_0 \cdot \frac{x_m^2}{2dL_0} \left[\frac{d}{L_0} + \frac{L_0}{R(L_0 - z_0)} + 1 \right] \right\}. \quad (28)$$

匹配滤波后,相应的方位向合成孔径分辨率近似为

$$\delta_x = \frac{2a_{sx}}{d/L_0 + L_0/R(L_0 - z_0) + 1}. \quad (29)$$

由(28),(29)式可知,当发射光束采用高斯光束时,匹配滤波器和方位向分辨率除了与接收光路有关之外,还与目标平面所在位置有关。例如,当目标在光腰处时($R=\infty$), (28),(29)式等效于菲涅耳深区情形。从(26)式可以知道,只有满足下式

$$z \gg z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda_0} \quad (30)$$

且 $R(z) \approx z \approx L_0 \gg d$, 合成孔径分辨率可近似为熟知的形式。式中 z_R 称为高斯光束的瑞利范围。如 $\lambda_0 = 155 \mu\text{m}$, $w_0 = 5 \text{ mm}$ 时, $z_R \approx 50.7 \text{ m}$, 对实验室演示系统,这是一个很长的距离。文献[11,12]的 SAL 演示系统可能也是处在瑞利范围内。

6 结 论

基于光学衍射理论,考虑到准单色光,详细探讨了条带模式 SAL 的匹配滤波器,特别给出了 3 种情况下匹配滤波器的具体表达式。结果表明,匹配滤波器与发射光束、目标距离及接收光学系统结构等有关,从而这些因素也影响了方位向合成孔径成像的分辨率。SAL 成像的高分辨率是基于探测光束双程远场衍射。因此,在搭建实验室 SAL 演示成像系统,采用高斯光束作为探测光时,在有限的空间内,要保证目标平面、接收透镜和汇聚平面三者之间满足几何光学的物像关系,同时,目标位置要设置在高斯发射光束的瑞利范围之外,否则,合成孔径成像的分辨率可能会受到影响。

参 考 文 献

- Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar (I): defocused and phase biased telescope for reception antenna [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 997~1000
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
- Liu Liren. Synthetic aperture 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
- Liu Liren. Synthetic aperture 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
- Liu Liren. Synthetic aperture 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
- Liu Liren. Synthetic aperture imaging lidar (V): imaging resolution and antenna aperture function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1408~1415
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V): 成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 566~568
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): 566~568
- Xing Mengdao, Guo Liang, Tang Yu *et al.*. Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 290~294
邢孟道, 郭亮, 唐禹等. 合成孔径激光雷达实验系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(2): 290~294
- Hong Guanglie, Wang Jianyu, Meng Zhaohua *et al.*. Chirp amplitude modulation and range dimension processing of near infrared synthetic aperture lidar [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2009, **28**(3): 229~234
洪光烈, 王建宇, 孟昭华等. Chirp 强度调制与近红外激光合成孔径雷达距离向处理[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(3): 229~234

- 9 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. 3th edn. Qin Kecheng *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 49
J. W. Woodman. 傅里叶光学导论[M]. 第三版. 秦克诚 等译. 北京:电子工业出版社,2006. 49
- 10 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
- 11 S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging ladar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl. Opt.* , 2005, **44**(35): 7621~7629
- 12 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiaye *et al.*. Principles of Lasers [M]. 6th edn. Beijing: National Defens Industry Press, 1995. 67
周炳琨, 高以智, 陈家骅 等. 激光原理[M]. 国防工业出版社, 1995. 67