

基于外差探测的合成孔径激光雷达成像模拟

张艳^{1,2}, 史晓丁², 陈涌², 赵彬², 周鼎富², 侯天晋²

- (1. 贵阳学院 电子与通信工程学院, 贵州 贵阳 550005;
2. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 根据线性调频信号的特点和光外差探测的原理, 推导了合成孔径激光雷达外差探测的输出信号表达式。针对点阵目标模拟了条带工作模式时的数据图像, 先对距离向进行傅里叶变换后校正剩余视频项, 再对方位向进行相关运算, 进而实现了目标图像的重构。推导得到了目标图像在距离向和方位向的解析表达式, 分析了目标图像在距离向和方位向的强度分布曲线的特点及其对成像的影响。分析了影响图像分辨率的因素和改进方法, 为优化算法和系统设计提供了参考。

关键词: 合成孔径激光雷达; 外差探测; 数据图像; 目标图像

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2027-05

Image simulation of synthetic aperture radar based on the heterodyne detection

Zhang Yan^{1,2}, Shi Xiaoding², Chen Yong², Zhao Bin², Zhou Dingfu², Hou Tianjin²

- (1. School of Electronic Communication Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China;
2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the LFM(linear frequency modulation) signal and the principle of the heterodyne, the expression of the output of the heterodyne detection in synthetic aperture radar was induced in detail. The data image of the array target was simulated in a strip-map mode sequentially. The object image was reconstructed by the method that Fourier transform and some emendation were used in the range direction while the correlation operation was used in the azimuth direction. The analytical expression of the object image was induced in both the range direction and the azimuth direction, so that the intensity distribution of the object image were analyzed in the azimuth direction and the range direction separately. Therefore, many improving methods were advanced by analyzing the factors on the image quality, which may provide many references for further optimization.

Key words: synthetic aperture radar; heterodyne detection; data image; object image

收稿日期: 2012-12-24; 修订日期: 2013-01-07

基金项目: 贵州省科技厅联合基金资助项目

作者简介: 张艳(1977-), 女, 讲师, 博士, 主要从事激光技术和激光雷达方面的研究。Email: Eileen_zy001@sohu.com

0 引言

为了获得高的速度分辨率和距离分辨率,合成孔径雷达(SAR)系统常常采用大时宽带宽积的线性调频信号作为发射信号,通过信号处理方式进行解线频调处理从而降低系统的采样率,整个过程涉及到信号处理电路的设计与算法流程,结构复杂,处理时间随回波信号的复杂程度而变化。而在合成孔径激光雷达(SAL)系统中,采用光纤耦合器等纯光学器件对回波信号和目标本振光进行光外差探测^[1-3],实现解线频调,降低系统采样率,具有结构简单、解调速度快的优点,使得基于光外差探测的合成孔径激光雷达成为国内外近年研究的热点^[4-7]。虽然已有大量文献对合成孔径激光雷达系统和成像算法进行研究,但针对外差探测系统从生成数据图像到重构目标图像这一完整过程的模拟,以及对目标图像在方位向和距离向分布特点的分析讨论少见报道,而这对于外差探测的合成孔径激光雷达的目标图像的理解和优化很重要。

文中针对光外差探测的机载合成孔径激光雷达系统,推导了外差探测的回波信号表达式,模拟了条带工作模式下点阵目标的原始数据图像,根据距离向处理和方位向处理后的解析表达式,分析了距离向和方位向的强度分布曲线的特点,讨论了影响合成孔径激光雷达图像的因素和改进方法,为实际应用提供参考。

1 基于外差探测的数据图像模拟

假设发射信号为线性调频信号,其表达式为:

$$S(\hat{t}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{\tau_p}\right) \cdot E_0 \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_c \hat{t} + \frac{1}{2} \gamma \hat{t}^2\right)\right] \quad (1)$$

式中: \hat{t} 为快时间,以各脉冲发射时刻为起点记录光波传播时间,即距离时间; τ_p 为脉冲持续时间; f_c 为线性调频信号的中心频率, γ 为调频斜率。

根据散射中心理论,可将雷达照射区域内的目标体回波信号表示为:

$$S_r(\hat{t}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} G S(\hat{t} - \tau_{ij}) \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 为目标点的后向散射系数,假设仅由目标的特性来决定,与雷达的相对位置及激光波长无关。 G

为天线增益。 τ_{ij} 为在点 $P(x_i, y_j)$ 到雷达的时延。

将公式(1)代入公式(2),则经距离 R_i 后的目标回波信号为:

$$S_r(\hat{t}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} G E_0 \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau_{ij}}{\tau_p}\right) \times \exp\left[j2\pi\left(f_c(\hat{t} - \tau_{ij}) + \frac{1}{2} \gamma(\hat{t} - \tau_{ij})^2\right)\right] \quad (3)$$

相应的本振信号可以表示为: $S_{r-10}(\hat{t}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau_{10}}{\tau_p}\right) \times \exp\left[j2\pi\left(f_c(\hat{t} - \tau_{10}) + \frac{1}{2} \gamma(\hat{t} - \tau_{10})^2\right)\right]$,其中, τ_{10} 为本振信号的时间延迟。

目标回波经外差接收后,从平衡探测器输出信号^[7]可以化简为:

$$S_{if_lar} = S_r(\hat{t}) \times S_{r-10}^*(\hat{t}) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} G E_0 \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau_{ij}}{\tau_p}\right) \times \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau_{10}}{\tau_p}\right) \cdot \exp\left(-\frac{j4\pi}{c} \gamma \left(t - \frac{2R_{10}}{c}\right) \Delta R_n\right) \times \exp\left(-\frac{j4\pi}{c} f_c \Delta R_n\right) \exp\left(\frac{j4\pi \gamma}{c^2} \Delta R_n^2\right) \quad (4)$$

式中:全时间 $t = \hat{t} + \eta = \hat{t} + n \cdot \text{PRT}$; \hat{t} 为快时间; η 为慢时间; n 为脉冲数; PRT 为脉冲重复周期。 $\Delta R_n = R_{ij} - R_{10}$,

$\tau_{ij} = \frac{2\sqrt{[v(\hat{t} + n \cdot \text{PRT}) - x_i]^2 + y_j^2 + h^2}}{c}$,根据公式(4),回波

信号就是以脉冲数 n 和快时间 \hat{t} 为自变量的函数。把平衡探测器输出的回波信号,作为快慢时间域中的一行,进行存储;将所需飞行时间内所有的回波信号,按照行排列依次放入快慢时间域里,构成了由快慢时间表示的数据图像。

2 成像算法

为简化表达式,令 $\sigma_{ij} G E_0 \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau_{ij}}{\tau_p}\right) \times \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau_{10}}{\tau_p}\right) = A$, $t_0 = \frac{2R_{10}}{c}$, $\Delta f_n = \gamma \frac{2\Delta R_n}{c}$ 。对于机载情况下,信号持续期内雷达载机的位置变化可忽略,即可忽略方位向和距离向的耦合,将距离向和方位向分开处理^[8]。根据公式(4),对解线频调后的信号做傅里叶变换,便可在频域得到对应于各回波的 sinc 函数状窄脉冲^[9]:

$$\hat{S}_{if_lar}(f_i) = \int_{t_0 - \tau_p/2}^{t_0 + \tau_p/2} \hat{S}_{if_lar}(\hat{t}) \exp[-j2\pi f_i(\hat{t} - t_0)] d\hat{t} =$$

$$A\tau_p \exp\left(-j4\pi f_c \frac{\Delta R_n}{c}\right) \exp\left(j4\pi\gamma \frac{\Delta R_n^2}{c^2}\right) \cdot \exp[-j2\pi t_0(f_i + \Delta f_n)] \text{sinc}[\tau_p(f_i + \Delta f_n)] \quad (5)$$

公式(5)中的第一个指数项含有多普勒信息,是方位向成像处理所需的数据;第二项指数项是视频剩余项,是解线频调所独有,会使多普勒值有所变化,需要进行补偿。可见,经傅立叶变换后得到 sinc 函数表示的窄脉冲,只需补偿峰值 $f_i = -\gamma \frac{2\Delta R_n}{c}$ 处的相位。根据第二个指数项的相位形式,将公式(5)乘以补偿函数 $\hat{S}(f_i) = \exp\left(-j \frac{\pi f_i^2}{\gamma}\right)$,即可得到:

$$\hat{S}(f_i) = A\tau_p \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{\Delta R_n}{c}\right) \exp[-j2\pi t_0(f_i + \Delta f_n)] \text{sinc}[\tau_p(f_i + \Delta f_n)] \quad (6)$$

公式(6)即目标图像在距离向的分布曲线,其最大值为 $\hat{S}(\Delta f_n) = A\tau_p \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{\Delta R_n}{c}\right)$ 。

从而,当雷达沿方位向运动时,所有回波脉冲信号的序列可以表示为:

$$\hat{S}_1(t) = A\tau_p \exp\left[-j \frac{4\pi}{c} f_0 \Delta R(t)\right] = A\tau_p \exp\left[-j \frac{4\pi}{c} f_0 [R(t) - R_0]\right] \quad (7)$$

设在 $t=0$ 时雷达处在坐标原点,雷达坐标 $\mathbf{x} = \mathbf{V}t$; 点目标的坐标是 (x_c, R_c) , R_c 是目标与雷达间的垂直距离。由于 $t_c = \frac{x_c}{V}$, $R_c \gg V|t - t_c|$, 根据上述的几何关系可以得到 t 时刻目标与雷达间的斜距为:

$$R(t) = \sqrt{R_c^2 + (x - x_c)^2} = \sqrt{R_c^2 + V^2(t - t_c)^2} = R_c + \frac{V^2(t - t_c)^2}{2R_c} \quad (8)$$

将公式(8)代入公式(7),并令 $K_a = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2}{dt^2} \varphi = -\frac{2V^2}{\lambda R_c}$, 得:

$$\hat{S}_1(t) = A\tau_p \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_c - R_0)\right] \exp[j\pi K_a (t - t_c)^2] \cdot \text{rect}\left(\frac{t - t_c}{T_s}\right) \quad (9)$$

这是调频率依赖于 R_c 的线性调频波,选择相关函数 $h^{-1}(t) = \exp(-j\pi K_a t^2)$, 将 $\hat{S}_1(t)$ 与 $h^{-1}(t)$ 进行相关运算得到目标图像在方位向的强度分布:

$$S_z(t_c) = \int_{t_c - T_s/2}^{t_c + T_s/2} \hat{S}_1(t) h^{-1}(t - t_c) dt = A\tau_p T_s \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_c - R_0)\right] \cdot \exp[-j\pi K_a (t_c' - t_c)^2] \text{sinc}[\pi K_a T_s (t_c' - t_c)] \quad (10)$$

结合公式(6)和公式(10),可以将完整的点目标图像表示为:

$$|S_z(f_i, t_c)| = A\tau_p T_s |\text{sinc}[\tau_p(f_i + \Delta f_n)] \cdot \text{sinc}[\pi K_a T_s (t_c' - t_c)]| \quad (11)$$

可见,对于重建后的点目标图像在距离向和方位向分布均是 sinc 函数分布。点阵目标的图像实质上是各点目标在距离向和方位向输出的 sinc 函数叠加所形成的包络。

3 模拟结果及分析

针对机载合成孔径激光雷达工作于条带模式的情况进行模拟,其几何示意图如图 1 所示,采用以下参数:工作波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 调谐带宽 $B = 3.0 \text{ GHz}$, 调谐速度 $v = 100 \text{ nm/s}$, 脉冲宽度 $\tau_p = 100 \mu\text{s}$, 调频斜率 $\gamma = 3 \times 10^{13} \text{ Hz/s}$, 天线尺寸 $D = 0.02 \text{ m}$, 脉冲重复频率 $f = 16.5 \text{ kHz}$, 场景中心斜距 $PO' = 10 \text{ km}$ (即雷达的飞行高度为 7.0711 km), 雷达飞行速度 $V = 100 \text{ m/s}$, 雷达视角 $\theta = 45^\circ$, 若成像区域在方位向的范围为 AB , L_s 为一个合成孔径长度,为了对该成像范围完整成像,雷达需要运动的距离为 $(AB + L_s)$ 。假设在方位向的成像范围为 $(0.1875 \text{ m}, 0.5875 \text{ m})$, 距离向的成像范围为 $(7069.1 \text{ m}, 7073.1 \text{ m})$, 将该成像区域设置成 9×9 的网格,设置目标点阵“ A ”上的网格点的反射系数设为 1,背景反射系数设为零,进行条带模式合成孔径激光雷达成像模拟。

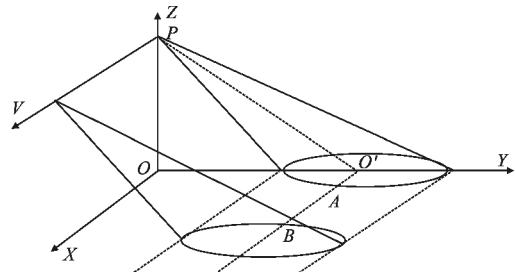


图 1 条带模式的几何示意图
Fig.1 Diagram of strip-map mode

根据公式(4)模拟出合成孔径激光雷达工作于条带模式时字母“ A ”的原始数据图像,如图 2 所示,其

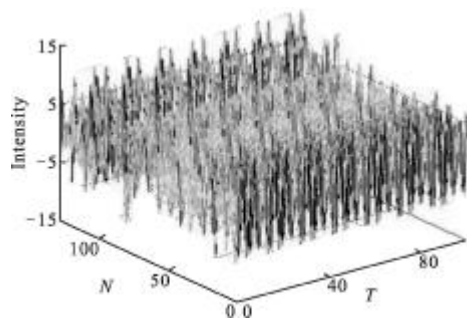


图 2 字母“ A ”的原始数据图像
Fig.2 Data image of letter A

中发射脉冲数 N 表示方位向距离, 脉冲时宽 T 表示距离向距离, 纵坐标表示信号幅值。显然, 对于点阵目标的原始数据图像, 无论在距离向还是方位向均没有明显可以识别的目标信息。

图 3 给出了恢复后的三维图, 可见恢复后的图像与设置的目标点阵分布一致, 但目标点在方位向和距离向具有明显边带, 这是由于线性调频信号经傅里叶变换后在方位向和距离向均为 sinc 函数分布造成的, 但两个方向上的 sinc 函数的具体形式不同, 使得变化趋势略有不同。

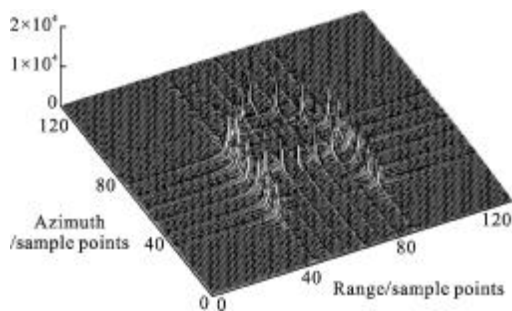


图 3 字母“A”的三维图
Fig.3 Solid image of letter A

距离向和方位向均有明显的边带, 并且目标点及其边带的强度随相邻目标点的距离而变化, 这是由于恢复后的每个目标点在方位向和距离向均是 sinc 函数分布, 相邻目标点的信号分别在方位向和距离向进行叠加造成的。减小动态范围(即设置较高的信号阈值), 虽然可以剔除旁瓣, 在一定程度上提高成像质量。但实际图像处理时不宜通过降低动态范围来获得没有边带的目标图像, 因为动态范围的降低可能将低反射率目标的弱回波信号进行剔除, 容易造成微弱目标遗漏。

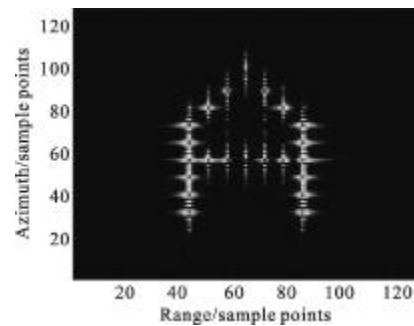


图 4 动态范围为 30 dB 时目标灰度图
Fig.4 Ichnography of 30 dB intensity range

为了直观显示, 选择恰当的动态范围将重构后的三维图像转化为灰度图像, 如图 4 所示给出了动态范围为 30 dB 时字母“A”的灰度图。可见目标点在

图 5 给出了单个目标点以及两个目标点在不同间距时的平面图和方位向强度分布图。可见, 当目标的方位向间距等于方位向分辨率($d = \rho$)时, 两个

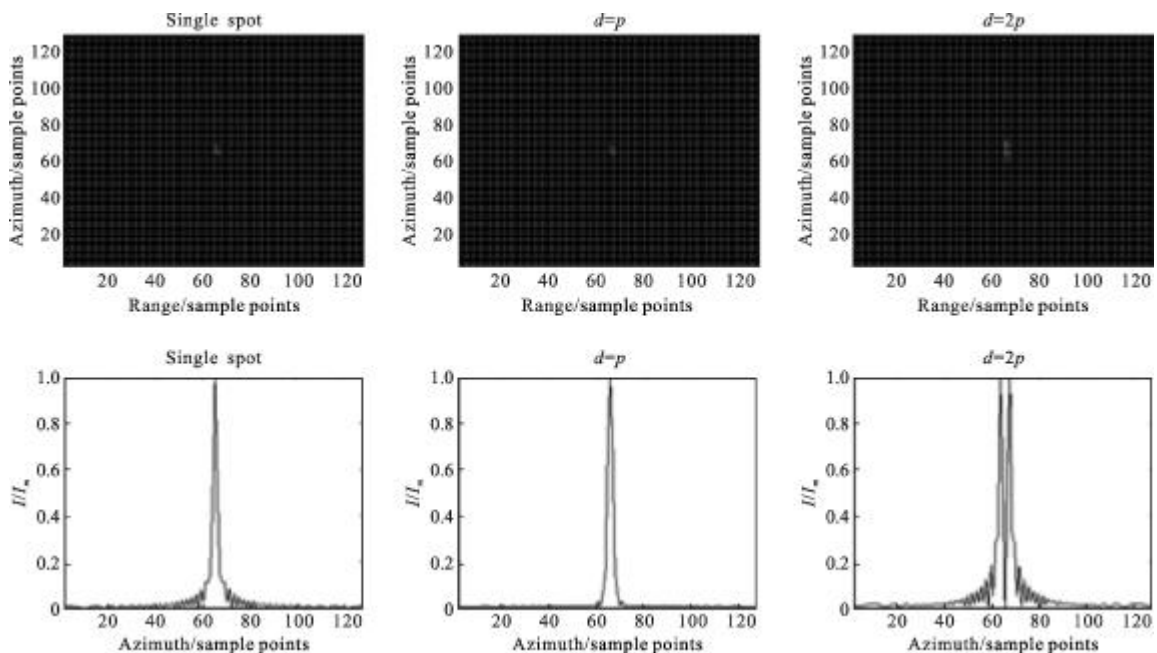


图 5 目标点位置对成像的影响
Fig.5 Effect of object position on the image

目标点的旁瓣恰好相互抵消,边带明显变窄,峰值强度增加,主瓣宽度有所增加。当 $d=2\rho$ 时,通过平面图和方位向强度分布图均可明显分辨两个目标点,但此时旁瓣较为明显,需要进一步采用旁瓣抑制算法提高图像质量,而压低旁瓣的加窗处理又会使分辨率下降。如果需提高方位向分辨率,就应减小雷达的天线孔径,而缩短天线孔径会明显降低信噪比,影响成像质量。故在合成孔径激光雷达系统设计时需要综合考虑信噪比和旁瓣抑制等因素,优化设计天线孔径和分辨率保证合成孔径激光雷达成像质量。

4 结论

文中建立的合成孔径激光雷达成像算法,是以散射中心理论和光外差探测原理为基础的,能够对条带工作模式下采用外差探测方式的合成孔径激光雷达系统进行成像模拟。通过对目标点阵的成像模拟,分析了影响合成孔径激光雷达实际分辨率的因素,并指出了改进的方向。

参考文献:

- [1] Stephen Marcus, Colella Barry D. Solid-state laser synthetic aperture radar[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(6): 960-964.
- [2] Beck Steven M, Buck Joseph R. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621-7629.
- [3] Bashkansky M, Lucke R L. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983-1985.
- [4] Liu Guoguo, Wu Jin, Zhu Bingqi, et al. Nonlinear degradation and compensation on range resolution in synthetic aperture lidar experiment [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39 (9): 934-938. (in Chinese)
刘国国, 吴谨, 朱炳祺, 等. 合成孔径激光雷达距离像分辨率非线性恶化与补偿[J]. *激光与红外*, 2009, 39(9): 934-938.
- [5] Zhu Bingqi, Wu Jin, Zhao Meijing, et al. Influence of optical axis on range imaging in stripmap synthetic aperture lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 11(2): 1-7. (in Chinese)
朱炳祺, 吴谨, 赵美静, 等. 条带式合成孔径激光雷达光轴影响距离成像研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 11(2): 1-7.
- [6] Xu Nan, Liu Liren, Lu Wei, et al. Signal processing construction and algorithm of range equal delay in SAIL [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(6): 1405-1409. (in Chinese)
许楠, 刘立人, 鲁伟, 等. 合成孔径激光成像雷达距离向等延时的信号处理结构和算法[J]. *电子学报*, 2010, 38(6): 1405-1409.
- [7] Li Fan, Wu Shuangyang, Zheng Yongchao, et al. Overview of the development of synthetic aperture lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 55-59. (in Chinese)
李番, 邬双阳, 郑永超, 等. 合成孔径激光雷达技术综述 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 55-59.
- [8] Bao Zheng. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006. (in Chinese)
保铮. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [9] Zhang Yun. A preliminary study on synthetic aperture lidar [D]. Beijing: The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
张云. 合成孔径激光雷达 [D]. 北京: 中科院电子学研究所, 2006.