

真实数据背景下的 SAR 运动目标回波信号模拟及应用¹

王 琦 王岩飞

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 该文提出了一种新的合成孔径雷达 (SAR) 原始数据模拟方法, 将模拟数据和实际测量数据结合在一起形成含有模拟运动目标和真实背景的 SAR 原始数据, 用于对 SAR 运动目标检测方法的验证和分析。根据 SAR 的成像原理和运动目标的回波模型, 该文给出了将模拟运动目标回波信号和真实背景回波数据叠加的半真实模拟数据的形成方法。通过将合成的数据应用于运动目标的检测试验, 验证了方法的有效性。

关键词 合成孔径雷达, 运动目标检测, 运动目标成像, 目标模拟
中图分类号 TN951

1 引 言

合成孔径雷达 (SAR) 是一种高分辨率成像雷达, 它采用相干雷达系统和运动中的单个天线模拟真实线性天线阵列, 可以获得高分辨率的地物图像^[1-3]。由于 SAR 具有全天候, 高分辨率成像等特点, 在民用和军事领域中获得了广泛的应用。在很多情况下, 除了要求 SAR 系统对地面静止目标成像外, 还要求对运动目标进行检测和成像, 例如辨别地面背景下运动中的船只、车辆等。

在研究各种运动目标检测和成像算法的过程中, 一种有效的手段就是利用典型目标回波数据来验证和分析算法的性能和效果。通常, 产生目标数据的方法可以分为两类: 一类是利用以前实际测量的数据来模拟所需要的数据^[4]; 另一类是根据数学模型通过计算机的运算来产生模拟数据^[4-7]。采用实际飞行获得的测量数据比较真实, 可以检验算法的实用性。但从外场飞行中获得的原始数据并不一定包含所需要参数的运动目标, 并且, 确定实际数据中运动目标的存在及其运动参数也比较困难。根据目标回波模型生成的模拟回波数据可以方便地验证运动目标检测与成像算法, 并且可以精确模拟和确定目标的各种运动参数, 有利于运动目标检测算法的研究。但是利用目标模型模拟的方法很难模拟作为背景杂波的具有分布特性的面目标信号, 因而对运动目标检测方法的实用性验证又有所不足。

针对在 SAR 运动目标检测方法研究中, 真实测量数据和模拟数据在算法检验过程中的不足, 本文提出了模拟运动目标信号与真实数据相合成形成混合模拟数据的方法, 通过利用两种数据分别具有的优势共同完成对运动目标检测算法的验证。

2 合成孔径雷达回波信号模型

对于正侧视模式的合成孔径雷达系统, 雷达平台与测绘带间位置关系如图 1 所示^[7]。

假设 $t = 0$ 时雷达平台所在位置 Q 为原点, 平台运动速度为 v_r , $x' = 0$ 。 P 为目标所在位置, 可以用雷达平面上坐标 (x, r) 唯一确定。采用复信号形式表达 SAR 发射的线性调频信号:

$$e(t) = \exp[j2\pi(f_0 t + (1/2)k_r t^2)] \cdot \text{rect}(t/\tau) \quad (1)$$

其中 τ 为脉冲宽度, k_r 为调频斜率, f_0 为载波频率。

¹ 2002-06-10 收到, 2003-01-10 改回

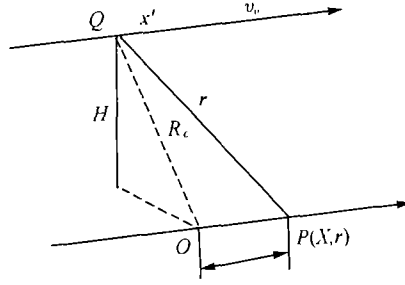


图 1 正侧视模式 SAR 的目标示意图

如果在 $t = t_n$ 时刻雷达发射一信号脉冲 $e(t - t_n)$, 点目标 P 位于波束范围内, 则雷达位置 $x' = x_n = v_a \cdot t_n$. 其中 v_a 代表雷达平台速度。雷达平台与目标间距离为

$$d(x', x, r) = |PQ| = \sqrt{r^2 + (x' - x)^2} \quad (2)$$

忽略雷达接到回波前的位移, 雷达接收到信号的延时 $\tau = 2r/c$, (c 为光速)。由此得到 SAR 收到的 P 点回波信号如下:

$$s(x', t - t_n, x, r) = A_i \cdot e(t - t_n - \tau) \quad (3)$$

其中 A_i 表示回波信号在散射和传播过程中的衰减, 可以由雷达方程确定

$$A_i^2 = F^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma / [(4\pi)^3 r^4] \quad (4)$$

F 表示 SAR 天线的二维功率方向图, σ 表示点目标 P 的后向微波散射系数。一般情况下距离向的天线方位图对测绘带内目标回波信号影响较小, 只考虑天线方位向方向图。

$$F_a(x') = \text{sinc}[\pi \cdot D_a \sin \phi(x') / \lambda] \quad (5)$$

式中 D_a 表示天线的长度, ϕ 表示波束方位向偏角。可以得到

$$F(x' - x, r) = F_a(x' - x) \cdot \text{rect}[(x' - x)/L'] \cdot \text{rect}(r/W') \quad (6)$$

L' 和 W' 分别为波束照射地域的方位向和距离向长度。综合以上分析, 回波信号可以表示为

$$s(x', t', x, r) = \sqrt{\frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \frac{\sigma^{1/2}}{r^2 + (x' - x)^2}} \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi D_a \sin \phi(x' - x)}{\lambda}\right) \\ \times \text{rect}\left(\frac{x' - x}{L'}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{r}{W'}\right) \cdot e\left(t' - \frac{2\sqrt{r^2 + (x' - x)^2}}{c}\right) \quad (7)$$

在模拟中, 回波信号中常系数项对待考察的参数指标没有影响, 可以忽略。取 L' 为合成孔径长度 L_s , W' 为测绘带宽度, 假设点目标位于坐标原点 O , 则忽略 (7) 式中常数项, 对模拟回波信号进行采样得到

$$s_r(m, n) = s\left(\frac{m}{\text{PRF}}, \frac{n}{f_s}\right) = \frac{\sigma}{R_c^2 + (m \cdot v_v / \text{PRF})^2} \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi D_a \sin \phi(m \cdot v_v / \text{PRF})}{\lambda}\right) \\ \times \text{rect}\left(\frac{m \cdot v_v}{\text{PRF} \cdot L_s}\right) \cdot e\left(\frac{n}{f_s} + \frac{2R_c}{c} - \frac{2\sqrt{R_c^2 + (m \cdot v_v / \text{PRF})^2}}{c}\right) \quad (8)$$

其中 σ 是目标的微波散射系数, f_s 为距离向采样频率, PRF 为脉冲重复频率即方位向采样频率. m 和 n 为回波方位向和距离向上离散采样点位置.

运动点目标与静止点目标的主要差别是在回波信号中引入了目标运动分量, 体现为合成孔径时间内目标与雷达平台的相对位移. 图 2 表示运动目标与雷达的几何关系. 目标的运动被分解为距离向分量和方位向分量.

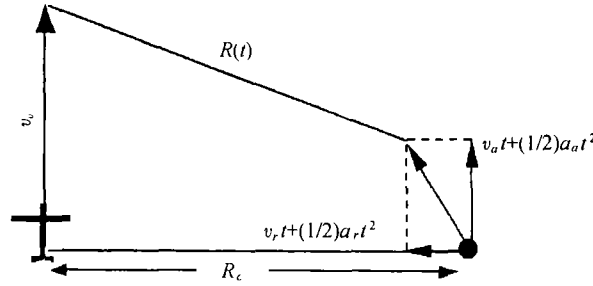


图 2 运动目标与雷达几何关系

由图 2 有

$$R^2(t) = (v_v t - v_a t - (1/2)a_r t^2)^2 + (R_c - v_r t - (1/2)a_r t^2)^2 \quad (9)$$

在 $t = 0$ 处展开, 并忽略高次项可以得到

$$R(t) \approx R_c - v_r t + [(v_v - v_a)^2 - R_c a_r] t^2 / (2R_c) = R_c - \varepsilon_{r'} x + [(1 - \varepsilon_{a'})^2 - \varepsilon_{r''}] x^2 / (2R_c) \quad (10)$$

其中 $\varepsilon_{r'} = v_r / v_v$, $\varepsilon_{r''} = a_r R_c / v_v^2$, $\varepsilon_{a'} = v_a / v_v$. 回波信号可以表示为

$$S_r(x) = g(x) \exp(-2jk\varepsilon_{r'} x) \exp(-jk(x^2/R_c)((1 - \varepsilon_{a'})^2 - \varepsilon_{r''})) \quad (11)$$

其中的 $g(x)$ 为天线方向图加权. 不考虑目标加速度, 回波多普勒斜率和带宽分别为

$$f_r = 2(v_v - v_a)^2 / (\lambda R_c) \quad (12)$$

$$\Delta f_d = 2(v_v - v_a) / D_a \quad (13)$$

目标距离向和方位向的速度及加速度都会对成像造成影响^[2]. 距离向速度会引起距离单元位移. 在合成孔径时间 T_s 这段时间里, 目标距离向位移导致记录的距离单元数据条带产生弯曲.

目标距离向速度分量的另一个影响是目标图像在方位向的偏移. 位移的大小与目标的相对距离向运动速度 $\varepsilon_{r''}$ 相关.

$$x = v_v(-\varepsilon_{r''} R_c / v_v) = -\varepsilon_{r''} R_c \quad (14)$$

方位向的速度和距离向加速度会对回波信号的调频斜率造成影响, 从 (11) 式可见回波信号线性调频项系数变为 $(1 - \varepsilon_{a'})^2 - \varepsilon_{r''}$, 和原始数据相比调频斜率约变化 $-2\varepsilon_{a'} - \varepsilon_{r''}$. 使用原来调频斜率进行相关滤波会造成方位向模糊.

运动目标检测算法利用这些影响把运动目标回波信号从静止目标回波信号背景中分离出来进行检测和成像。修改静止目标回波模拟 (8) 式, 得到运动点目标回波信号模拟表达式:

$$s_r(m, n) = \frac{\sigma}{\left(R_c + \frac{m \cdot v_r}{\text{PRF}} + \frac{1}{2} \cdot a_r \cdot \left(\frac{m}{\text{PRF}}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{m \cdot (v_v - v_a)}{\text{PRF}}\right)^2} \cdot \text{sinc} \left(\frac{\pi D_a \sin \phi \left(\frac{m \cdot (v_v - v_a)}{\text{PRF}}\right)}{\lambda} \right) \times \text{rect} \left(\frac{m \cdot v_v}{\text{PRF} \cdot L_s} \right) \cdot e \left(\frac{n}{f_s} + \frac{2R_c}{c} - \frac{2\sqrt{\left(R_c + \frac{m \cdot v_r}{\text{PRF}} + \frac{1}{2} \cdot a_r \cdot \left(\frac{m}{\text{PRF}}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{m \cdot (v_v - v_a)}{\text{PRF}}\right)^2}}{c} \right) \quad (15)$$

相对于 (8) 式, (15) 式增加了目标运动变量, 包括目标距离向运动速度 v_r , 方位向运动速度 v_a 和距离向加速度 a_r 。模拟过程中可根据需要调节这些运动参数获得不同目标回波。

3 实际回波信号与模拟运动点目标的回波信号合成

将实际飞行得到的原始数据对应的雷达参数代入上面给出的运动目标回波模型, 可以得到模拟运动目标的回波信号数据。模拟数据同实际数据采样点保持一致, 可按照图 3 框图对数据文件进行合成。

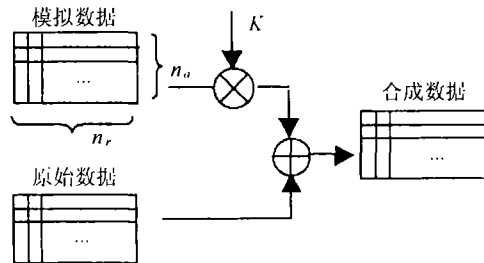


图 3 数据合成框图

真实回波信号由接收机输出信号直接采样, 按照距离向和方位向两维存储成为数据文件。距离向和方位向的采样点数分别为 n_r 和 n_a , 在数据文件中回波信号存储为 $n_r \cdot n_a$ 二维数组。同样, 模拟生成的运动点目标回波数据也存储为 $n_r \cdot n_a$ 二维数组形式, 各采样点上的模拟回波信号数据在乘以加权系数 K 后与对应采样点的原始回波信号数据直接相加, 得到合成回波数据文件。

模拟回波信号与原始数据相加时, 模拟回波数据需要乘上加权系数 K 用以调节模拟点目标的回波信号强度。模拟数据的生成程序中假定点目标的反射系数为 1, 另外回波信号模型中也忽略了发射雷达信号强度、接收机增益以及信号衰减等常数项, 因此所得模拟回波信号幅值与真实回波信号的幅值并不匹配。模拟信号所乘系数 K 包含了这些常数项, 同时因为实际目标的反射强度和目标的反射系数、类型以及大小都有关系, 调整加权系数 K 即意味着调整模拟点目标的反射特性。

为了验证数据模拟方法的有效性, 我们利用实际飞行获得的 SAR 回波信号进行回波数据合成试验, 根据实际数据的雷达参数生成模拟点目标回波信号并与原始数据合成。

图 4 即模拟点目标的回波数据与原始数据合成的成像结果。左边箭头所指为加入的静止模拟点目标。加权系数 K 经过调整, 模拟点目标的亮度与图像平均亮度水平相一致。由于目标静止, 在图中准确成像, 没有位置偏离。右边箭头所指点目标为加入的模拟运动点目标, 该点目

标位置与左方静止点目标位置相同, 距离向速度 $v_r = 5\text{m/s}$, 距离向加速度 $a_r = 0\text{m/s}$, 方位向速度 $v_a = 0\text{m/s}$ 。回波合成采用的加权系数 K 也与右面静止点目标相同。所成图像中运动目标位置同静止目标相比在方位向上有明显偏移, 这是模拟点目标距离向运动分量造成的。将 $v_r = 5\text{m/s}$ 代入 (14) 式得到目标偏离距离为 490m , 与图中目标的位移一致。算法比较好地模拟了静止和运动点目标回波信号。

修改目标运动参数为距离向速度 $v_r = -30\text{m/s}$, 方位向速度 $v_a = 0\text{m/s}$, 生成模拟数据并与原始数据相合成。该运动目标回波信号中心频率为 $2 \times v_r / \lambda = 2 \times 30 / 0.24 = 250\text{Hz}$, 已经处于静止目标回波信号的多普勒带宽之外, 使用标准 R-D 算法所成地面图像中无法看到模拟运动目标。使用频域滤波法对运动目标进行检测和成像^[4]。

图 5 为通过中心频率 $C_f = -253\text{Hz}$ 的滤波通道所成图像。该通道已经完全滤除静止目标信号, 可以从图中判定存在运动点目标。由于 $v_r = -30\text{m/s}$ 基本同滤波器通道中心频率对应距离向速度相一致, 点目标成像位置接近于原始位置。

从模拟结果中可以看出, 采用模拟数据与真实数据合成的数据, 能够比较有效地用于对运动目标检测方法的检验和分析。并且, 方法本身的实现也比较简单。

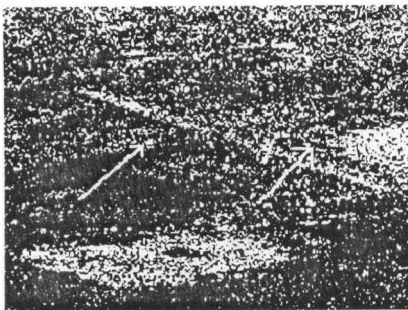


图 4 模拟点目标 $R = R_0 + 6500\text{m}$,
 $v_r = 0\text{m/s}$ 及 $v_a = 5\text{m/s}$, 标准 R-D 算法成像

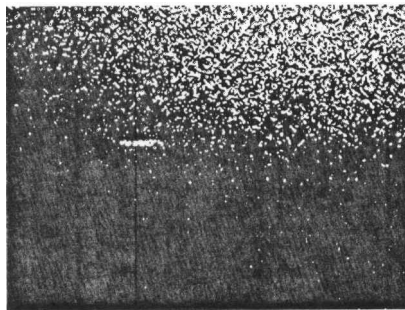


图 5 模拟点目标 $R = R_0 + 6500\text{m}$,
 $v_r = -30\text{m/s}$, 频域滤波法成像

5 结 论

本文通过对运动目标雷达回波特性的分析获得了运动目标回波表达式, 将模拟目标回波与实际场景回波数据相结合形成新的合成原始数据。针对合成数据进行的成像和运动目标检测试验验证了合成数据的有效性。由于这种方式形成的原始数据包含了可调整参数的运动目标回波信号和真实的地面背景信号, 将其应用到各种动目标检验和成像算法的验证和分析中弥补了单纯使用模拟回波信号或者采用实际飞行的原始数据两种方式存在的不足, 更有利于对各种动目标检测算法的评价。

参 考 文 献

- [1] J. Curlander, R. McDonough, Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing, New York: Wiley, 1991, 4-108.
- [2] 张澄波, 综合孔径雷达原理、系统分析与应用, 北京, 科学出版社, 1989, 第 1, 2, 3, 6 章.
- [3] 杨士中, 合成孔径雷达, 北京, 国防工业出版社, 1981, 第 1, 2, 3, 4, 8 章.
- [4] 张冰尘, 合成孔径雷达实用化运动目标检测和成像技术研究, [硕士论文], 中国科学院电子学研究所, 1999.
- [5] 孙泓波, 顾红, 苏为民, 刘国岁, 机载合成孔径雷达对动目标的检测和成像, 现代雷达, 2002, 1, 42-46.

- [6] 何俊湘, 李景文, 周萌清, 合成孔径雷达动目标成像的一种新方法, 电子学报, 1995, 23(9), 19-23.
[7] 王岩亭, 合成孔径雷达并行处理与距离模糊研究, [硕士论文], 北京, 中国科学院电子学研究所, 1997.

MOVING TARGET SIMULATION WITH REAL DATA AND ITS APPLICATION TO SAR

Wang Qi Wang Yanfei

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract This paper presents a new SAR raw data simulation method that is used to test and analyze the algorithm of moving target detection. The simulated SAR raw data are generated by superimposing the simulation moving target echo to a real background reflection data. The compound data are tested with the R-D imaging algorithm and MTI algorithm. The result validates the simulation method.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Moving Target Detection (MTD), Moving Target Imaging (MTI), Target simulation

王 琦: 男, 1976 年生, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.

王岩飞: 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 主要从事有关微波成像雷达系统和基本理论、以及数字信号处理方面的研究工作.