

机载混合模式 SAR 波束指向控制对图像质量的影响

蒋彦婷 周荫清 徐华平

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要: 针对机载混合模式 SAR 系统, 该文给出了步进式波束控制下雷达波束对地面点目标照射强度的数学模型; 通过分析方位向回波压缩信号, 结合数学推导, 提出波束控制对图像质量的影响主要体现在: 波束指向被控时间导致出现无穷多对成对回波; 混合度造成的主瓣展宽导致方位向分辨率下降; 混合度造成的旁瓣压低导致成对回波对图像质量影响加大; 混合度和波束指向被控时间相互作用使成对回波存在畸变。并利用计算机仿真验证了论证分析的正确性。最后对机载混合模式 SAR 波控方案的制定提出了建议。

关键词: 合成孔径雷达; 混合模式; 波束指向控制; 成像质量

中图分类号: TN959. 73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0335-04

Effect of Air Hybrid Mode SAR Beam Point Steering on the Image Quality

Jiang Yan-ting Zhou Yin-qing Xu Hua-ping

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: A mathematical model of the illumination intensity, which is imposed on the point target by the radar beam step steered, is proposed for the hybrid mode SAR system. By the analysis of azimuth compressed echo signal, combining mathematical deduction, the effects of beam pointing on the image quality are proposed, which are including: the steering time of beam pointing causes infinite paired echo; the hybrid factor causes the extension of the main lobe, which results in the decrease of azimuth resolution; the hybrid factor causes the decrease of the side lobe, which increases the effect of paired echo on the image quality; the interaction of the hybrid factor and the steering time of beam pointing causes aberration of echo. These are also demonstrated by the simulation. Finally, the suggestion of establishment of the hybrid mode SAR antenna beam point steering is proposed.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Hybrid mode; Beam point steering; Image quality

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种高分辨率微波成像雷达, 它具有全天时, 全天候对地观测及成像的能力^[1], 应用领域很多, 发展前景广阔^[2]。SAR 系统包含多种工作模式, 混合模式是在条带模式和聚束模式^[3]基础上发展出来的一种新兴的工作模式。

混合模式 SAR 在工作过程中, 按照一定规律不断调整雷达波束的照射角度, 使波束中心一直指向地平面以下的某个交点。相对于条带模式, 它能较长时间地照射到地面目标, 以减小方位向测绘带宽度的代价获得更大的多普勒带宽, 从而提高方位向分辨率。相对于聚束模式, 它能以降低回波信号多普勒带宽的代价获取更大的方位向测绘带宽度^[4]。可以说, 混合模式 SAR 是条带 SAR 和聚束 SAR 性能的折衷体现^[5], 通过波束指向交点的调整, 可以灵活控制其折衷程度。合理的波束控制是混合模式 SAR 正确工作的基础, 制定波束控制方案也是其系统设计中的重要一环。

本文结合理论推导和计算机仿真, 详细分析了混合模式 SAR 波束控制规律对图像质量的影响, 在兼顾系统性能要求

和实际运用的可行性两方面的前提下对波束控制方案的设计提出了建议。

2 机载混合模式 SAR 基本原理

机载混合模式 SAR 空间几何关系如图 1 所示^[6]。图 1 中, T_{syn} 为合成孔径时间, T_{beam} 为天线波束在地面投影宽度所对应的载体飞行时间, v 为载体飞行的速度, P 为波束指向的交点, H 为交点 P 与飞行轨迹的垂直距离, h 为交点 P 与地面的垂直距离。

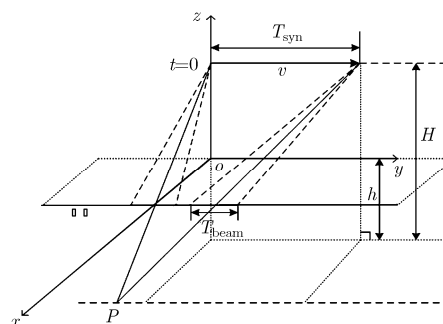


图 1 机载混合模式 SAR 空间几何模型

混合模式 SAR 在合成孔径时间内, 不断调整雷达波束角度, 使其一直指向交点 P 。这样的工作方式决定了它的特性。一方面, 波束指向调整后能更长时间地照射到地面目标, 增大回波的多普勒带宽, 从而提高系统的方位向分辨率; 另一方面, 由于交点 P 位于地平面以下, 在整个合成孔径时间内波束扫过的方位向测绘带宽度会大于相同条件下的聚束 SAR。

混合模式 SAR 中混合度 M 定义为地面到波束交点垂直距离与载机到波束交点垂直距离的比值, 即

$$M = h/H \quad (1)$$

从混合模式 SAR 几何模型看出, 混合度 M 的取值在 0 到 1 之间。方位向分辨率随 M 减小而提高, 测绘带宽度随 M 增大而增大。当 $M = 0$ 时, 波束交点位于地面, SAR 系统等效为聚束模式, 此时可获得最高的方位向分辨率, 但测绘带宽度最小; 当 $M = 1$ 时, 波束交点位于无穷远处, SAR 系统等效为条带模式, 此时可获得最大的测绘带宽度, 但方位向分辨率最低。

3 机载混合模式 SAR 天线波束指向控制分析

3.1 步进式波束指向控制方法

混合模式 SAR 要求在合成孔径时间内, 天线波束中心始终指向地平面以下的一个交点, 但实际系统中的天线波束指向不可能实现连续变化。通常混合模式 SAR 采取一种与聚束 SAR 类似的步进式波束控制方法, 每隔固定的时间调整一次波束指向, 在此时间段内保持指向不变。在混合模式 SAR 中, 天线波束指向控制比率 ε ^[7] 定义为

$$\varepsilon = v \cdot t_0 / W_a \quad (2)$$

其中 t_0 为天线波束指向被控时间; W_a 为雷达波束在地面投影的方位向宽度, 它与天线尺寸和混合度有关。简而言之, 此方法就是每过 t_0 时间调整一次天线波束指向, 使波束中心重新照射到交点。

在机载混合模式 SAR 的波束控制中, t_0 的选择需满足使 $0 < \varepsilon \leq 1$, 因为此时 $v \cdot t_0 \leq W_a$, 表示载机在一个被控时间内飞过的距离在波束投影的方位向宽度之内。这样可以保证在波束指向不改变的 t_0 时间内, 地面目标能够被持续照射。

3.2 波束控制对目标照射强度的影响

当混合模式 SAR 系统通过均匀加权的天线发射雷达波束时, 地面点目标被波束照射的强度可表示为

$$w(t) = \sum_{n=-N}^N \text{sinc}^2 \left[\frac{\pi L}{\lambda R} (x - MVnt_0 - V(t - nt_0)) \right], \quad nt_0 \leq t < (n+1)t_0 \quad (3)$$

其中 t 为方位向时间变量, λ 为雷达波长, R 为参考斜距, L 为天线方位向尺寸, V 为载机飞行速度, x 为点目标相对于场景中心的方位向坐标, M 为系统混合度, t_0 为波束指向被控时间, 它与天线波束指向控制比率 ε 有一一对应的关系,

N 为在每半个合成孔径时间内波束指向需要调整的次数。

图 2 给出在一些典型的 M 和 ε 值下地面场景中心点目标被波束照射强度随方位向时间变化曲线。

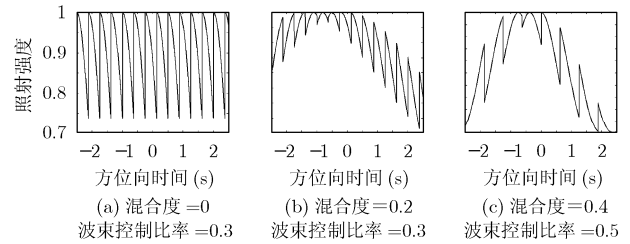


图 2 不同参数下地面点目标照射强度

从图 2 及式(4)看出, 机载混合模式 SAR 波束指向控制对回波幅度的影响可分为两个部分。一方面, 波束指向每隔 t_0 时间调整一次, 造成回波幅度产生以 t_0 为周期的波动; 另一方面, 波束指向交点位于地平面以下, 使地面上点目标不能在波束指向调整后位于波束中心, 其被波束照射的强度呈现与天线方向性图类似的变化, 具体规律与混合度 M 有关。

3.3 波束控制对图像质量的影响

由于受波束指向控制的限制, 方位向回波信号幅度会产生调制, 对其进行匹配滤波以后的信号也相应会产生畸变, 从而影响成像质量。下面对此进行具体分析。

回波信号经过匹配滤波器以后的输出为

$$\begin{aligned} S_o(t) &= S_i(t) * h(t) \\ &= w(t) \exp(-j\pi f_r t^2) * \exp(j\pi f_r t^2) \\ &= \exp(j\pi f_r t^2) \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau) \exp(-j2\pi f_r t\tau) d\tau \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $S_i(t)$ 为系统接收的方位向回波信号, $h(t)$ 为匹配滤波参考信号, $w(t)$ 为波束控制造成的回波信号幅度调制, f_r 为多普勒调频率, $*$ 表示卷积。

将式(3)代入式(4), 忽略二次相位项 $\exp(j\pi f_r t^2)$, 得到

$$\begin{aligned} S_o(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-N}^N \text{sinc}^2 \left[\frac{\pi L}{\lambda R} (x - MVnt_0 - V(\tau - nt_0)) \right] \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi f_r t\tau) d\tau \\ &= \sum_{n=-N}^N \exp(-j2\pi f_r nt_0 t) \int_0^{t_0} \text{sinc}^2 \left[\frac{\pi L}{\lambda R} (x - MVnt_0 - V\tau) \right] \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi f_r t\tau) d\tau \quad (5) \end{aligned}$$

现假设点目标位于场景中心。若非场景中心, 则回波信号幅度在时域上会存在偏移, 但不影响推导结果。令 $w = 2\pi f_r t$, 有

$$\begin{aligned} S_o(t) &= \sum_{n=-N}^N \exp(-j2\pi f_r nt_0 t) \\ &\quad \cdot \int_0^{t_0} \text{sinc}^2 \left[\frac{\pi L}{\lambda R} (MVnt_0 + V\tau) \right] \exp(-jw\tau) d\tau \\ &= \sum_{n=-N}^N \exp(-j2\pi f_r nt_0 t) \\ &\quad \cdot F \left[\text{sinc}^2 \left[\frac{\pi L VM}{\lambda R} (nt_0 + \tau) \right] G[0, t_0] \right] - E(t) \quad (6) \end{aligned}$$

其中 $F(\alpha)$ 表示对 α 进行傅里叶变换, $G[a, b]$ 表示在区间 $[a, b]$ 内取值为 1 的矩形脉冲。

由式(6)看出, 天线波束指向控制对方位向回波压缩信号的作用分为 3 部分。 $\exp(-j2\pi f_r n t_0 t)$ 主要由波束指向被控时间 t_0 决定, $F\left[\text{sinc}^2\left[\frac{\pi L V M}{\lambda R}(n t_0 + \tau)\right]G[0, t_0]\right]$ 主要由混合度 M 决定, 畸变项 $E(t)$ 则是因为 t_0 与 M 的相互作用而产生。下面分别进行分析。

令 $M = 0$, 此时等同于聚束 SAR 的情况, 波束指向每一次调整均使波束中心照射到目标。在此前提下, 式(6)变为

$$S_o(t) = F\left[\text{sinc}^2\left(\frac{\pi L V}{\lambda R}\tau\right)G[0, t_0]\right] \cdot \sum_{n=-N}^N \exp(-j2\pi f_r n t_0 t) \quad (7)$$

观察式(7), 当 $t = m/(f_r t_0)$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时,

$\sum_{n=-N}^N \exp(-j2\pi f_r n t_0 t) = 2N + 1$, 达到最大值。这说明由于幅度的周期性调制, 回波信号经过匹配滤波后在时域产生无穷多对成对回波^[8], 分别位于 $t = m/(f_r t_0)$ ($m = \pm 1, \pm 2, \dots$) 处。

式(7)前半部分决定了成对回波幅度的大小, 可以利用傅里叶变换的性质, 进行如下变形:

$$\begin{aligned} & F\left[\text{sinc}^2\left(\frac{\pi L V}{\lambda R}\tau\right)G[0, t_0]\right] \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} F\left[\text{sinc}\left(\frac{\pi L V}{\lambda R}\tau\right)\right] * F\left[\text{sinc}\left(\frac{\pi L V}{\lambda R}\tau\right)\right] * F[G[0, t_0]] \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda R}{L V} t_0 T \left[-\frac{L}{2V}, \frac{L}{2V}\right] * \left[\text{sinc}(\pi f_r t_0 t) \exp(-j\pi f_r t_0 t)\right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $T[a, b]$ 表示在区间 $[a, b]$ 内有值, 最大值为 1 的三角脉冲, $*$ 表示卷积。

下面, 分析混合度 M 对成像质量的影响。令 $t_0 = 0$, 表示波束指向符合理想情况, 即波束指向连续变化, 每个时刻均指向波束交点, 但此交点的位置由 M 决定。在此条件下, 并利用傅里叶变换的性质, 式(6)可写为

$$\begin{aligned} S_o(t) &= F\left[\text{sinc}^2\left(\frac{\pi L}{\lambda R} M V \tau\right)G\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]\right] \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda R}{L M V} T T \left[-\frac{L M}{2V}, \frac{L M}{2V}\right] * \left[\text{sinc}(\pi f_r T t)\right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中 T 为系统合成孔径时间, $*$ 表示卷积。

式(9)表示一个三角脉冲和一个抽样脉冲的卷积。当抽样脉冲主瓣宽度大于三角脉冲宽度时, 匹配滤波后信号的主瓣宽度主要由抽样脉冲决定, 大约是 $1/(f_r T)$ 。在这里定义主瓣宽度为第一零点的位置。当三角脉冲宽度大于抽样脉冲主瓣宽度时, 匹配滤波后信号的主瓣宽度主要由三角脉冲决定, 大约是 $L M / (2V)$ 。

对于畸变项 $E(t)$, 由式(6)推导得

$$\begin{aligned} E(t) &= \sum_{n=-N}^N \exp(-j2\pi f_r n t_0 t) F \cdot \left\{ \text{sinc}^2\left(\frac{\pi L V M}{\lambda R}(n t_0 + \tau)\right) \right. \\ &\quad \left. - \text{sinc}^2\left(\frac{\pi L V}{\lambda R}(M n t_0 + \tau)\right) \right\} G[0, t_0] \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda R t_0}{L V} \sum_{n=-N}^N \exp(-j2\pi f_r n t_0 t) \left[\text{sinc}(\pi f_r t_0 t) \exp(-j\pi f_r t_0 t) \right] \\ &\quad * \left[\frac{1}{M} T \left[-\frac{L M}{2V}, \frac{L M}{2V}\right] \exp(2\pi f_r n t_0 t) \right. \\ &\quad \left. - T \left[-\frac{L}{2V}, \frac{L}{2V}\right] \exp(2\pi f_r M n t_0 t) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

在各成对回波中心 $t = m/(f_r t_0)$ ($m = \pm 1, \pm 2, \dots$) 处, 畸变项 $E(t)$ 会达到极大值, 故在 t_0 和 M 共同作用时, 成对回波中心会出现明显的下陷。

综合以上的分析结果, 混合模式 SAR 波束指向控制对成像质量的影响有以下几点:

(1) 波束指向以被控时间 t_0 为周期进行调整, 造成方位向压缩以后的回波信号出现成对回波, 当其峰值大于主回波的峰值旁瓣时, 图像质量会受到较大影响。第一成对回波, 也就是成对回波的峰值位置为方位向时间 $t = 1/(f_r t_0)$ 处, 峰值幅度随 t_0 增大而增大。 t_0 越小, 成像质量就越好, 但系统实现的难度也就越大。

(2) 混合度 M 使回波幅度在方位向上产生被天线方向图加权的效应, M 取值较大时会造成方位向回波压缩以后主瓣展宽, 旁瓣压低, 导致图像分辨率下降。主瓣宽度(以方位向时间测度)的理论值为 $\max(1/f_r T, L M / 2V)$ 。

(3) 提高混合度 M 可使压缩信号的旁瓣降低, 但不能相应地压低成对回波, 从而会造成本来较小的成对回波的峰值超过主回波旁瓣的峰值, 增大成对回波对成像质量的影响。

(4) 由于 t_0 和 M 的相互作用, 压缩后的方位向回波存在畸变, 各成对回波中心出现明显的下陷, 成对回波峰值也会有所下降。

4 计算机仿真结果

为了验证以上分析的正确性, 对方位向回波信号的压缩结果进行计算机仿真。仿真参数如表 1 所示。

表 1 计算机仿真参数

波长	0.02 m
载机速度	150 m/s
载机高度	7000 m
方位向天线尺寸	1.3 m
雷达视角	55°
合成孔径时间	5 s

在不同的天线波束指向控制比率 ϵ 和混合度 M 下, 一些典型的地面场景中心点目标方位向回波压缩后信号如图 3 所示。

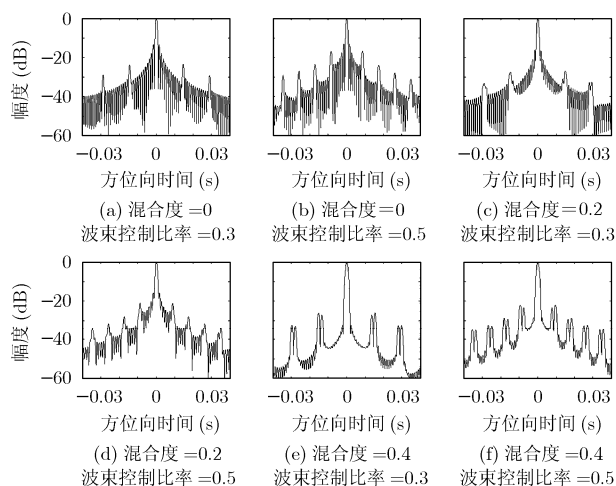


图3 不同参数下点目标方位向回波压缩信号

在不同波控参数下的成像指标仿真结果如表2所示。表2中第一成对回波位置及主瓣宽度以方位向时间 t 测度。分析图3和表2得到,随着 ε 的增大,成对回波更靠近主瓣,幅度也更高,对成像质量的影响也就越明显。随着 M 的增大,压缩后的方位向回波呈现明显的主瓣展宽,旁瓣压低的趋势。也就是说, M 增大会导致图像的方位分辨率降低。

表2 成像指标仿真结果一览表

	第一成对回波幅度(dB)	第一成对回波位置(t)	主瓣宽度(t)	峰值旁瓣幅度(dB)	
$M=0$	$\varepsilon=0$	—	—	0.0010	-13.33
	$\varepsilon=0.3$	-23.95	-0.0145	0.0010	-13.35
	$\varepsilon=0.5$	-16.87	0.0084	0.0010	-13.29
$M=0.2$	$\varepsilon=0$	—	—	0.0011	-16.88
	$\varepsilon=0.3$	-27.54	0.0148	0.0011	-16.47
	$\varepsilon=0.5$	-21.22	0.0087	0.0012	-15.72
$M=0.4$	$\varepsilon=0$	—	—	0.0019	-35.82
	$\varepsilon=0.3$	-26.11	0.0143	0.0019	-32.37
	$\varepsilon=0.5$	-21.99	0.0085	0.0019	-28.56

观察图3还能看出,当 ε 和 M 取值均不为零时,每个成对回波中心都出现了凹陷,随着 M 增大这个现象也越明显。这是由于式(3)中 M 和 t_0 相互作用,产生畸变项 $E(t)$,使压缩后信号在成对回波中心出现极小值造成的。这样的畸变使各成对回波幅度有所降低,也会在一定程度上影响成像质量。

计算机仿真结果与理论推导的结论一致。根据以上的研究和仿真分析,可以对机载混合模式SAR系统的天线波束控制方案的制定提出如下建议:

(1)首先考虑测绘带宽度和方位向分辨率的指标要求,确

定系统采用的混合度,从而确定出波束指向交点。

(2)确定混合度以后,根据峰值旁瓣比、积分旁瓣比等指标要求,结合系统实现的难易程度,选取合适的波束指向被控时间。

(3)利用仿真验证等方法综合评估各个波控参数对成像指标和成像质量的影响,制定完善的波控方案。

5 结束语

针对机载混合模式SAR系统。在步进式波束控制下,波束指向被控时间会使压缩后的方位向信号出现无穷多对成对回波;混合度会使主瓣展宽,旁瓣压低,从而降低方位向分辨率并加大成对回波的影响;二者相互作用还会造成信号畸变。这些因素均会影响成像质量。在实际应用中,应该综合考虑方位向分辨率、峰值旁瓣比、积分旁瓣比、测绘带宽度等成像指标,以及系统实现的难易程度,制定正确的波束指向控制方案。

参考文献

- [1] 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,1989:1-12.
- [2] Franceschetti G and Lanari R. Synthetic Aperture Radar Processing. USA: CRC Press, 1999: 25-27.
- [3] Getal C W. Spotlight Synthetic Aperture Radar. Boston: Artech House, 1995: 31-36.
- [4] Belcher D P and Baker C J. High resolution processing of hybrid strip-map/spotlight mode SAR. *IEE Proc.-Radar, Sonar and Navigation*, 1996, 143(6): 366-374.
- [5] Belcher D P and Baker C J. Hybrid Strip-map/Spotlight SAR. *IEE Colloquium on Radar and Microwave Imaging, USA*, November 1994, vol.2: 1-7.
- [6] Lanari R, Zoffoli S, Sansosti E, Fornaro G, and Serafino F. New approach for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing. *IEE Proc.-Radar, Sonar and Navigation*, 2001, 148(6): 363-372.
- [7] 王国栋,周荫清.机载聚束式SAR天线波束指向控制分析. *遥测遥控*, 2005, 26(3): 31-36.
- [8] 黄岩,李春升,陈杰,周荫清.机载SAR天线指向稳定度对成像质量的影响. *北京航空航天大学学报*, 2000, 26(3): 282-285.

蒋彦婷:女,1981年生,硕士生,研究方向为聚束模式及混合模式SAR成像、机载SAR目标定位及运动补偿等。

周荫清:男,1936年生,教授,博士生导师,中国电子学会会士,研究方向为信息获取与处理、高分辨率成像雷达和时变谱估计等。

徐华平:女,1977年生,博士后,讲师,研究方向为信息获取与处理、高分辨率雷达成像、分布式星载SAR的实现方法等。