

AMTI 与 SAR 兼容系统的研究

赵志钦 熊思民 黄顺吉

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

摘要 本文通过对 AMTI 和 SAR 信号处理算法的分析,提出了一个完整的 AMTI 与 SAR 兼容的雷达体制处理模型,并对该体制的可行性进行了深入的理论论证. 计算机模拟结果表明,该系统不仅具有对静止目标的良好成像能力,而且能成功地检测出强地杂波背景下的运动目标.

关键词 成像处理,参考函数,杂波抑制,兼容系统,对消比

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 由于具有对静止目标的高分辨率成像能力而被广泛用于各个领域. 但是出于实际应用的需要,我们希望不仅能对静止目标良好成像,而且希望能检测出强地杂波背景下的运动目标态势,由此引出了自适应运动目标显示 (Adaptive Moving Target Indication, AMTI) 与 SAR 兼容体制的研究. 对传统的 SAR 成像处理来说,由于参考函数的选择仅出于对静止目标成像的考虑,因此对运动目标将出现严重的失配,从而导致运动目标成像能力的下降,定位误差增大,甚至难以检测出运动目标. 而 AMTI 技术对强地杂波具有良好的抑制作用,能检测出运动目标. 因此,AMTI 与 SAR 兼容性的研究具有深远的实际意义. 下面,首先从 AMTI 和 SAR 的处理算法分析入手,提出一个完整的兼容体制方案,并对该方案进行深入的理论论证和计算机模拟.

2 AMTI 和 SAR 的信号处理^[1-4]

因为 AMTI 和 SAR 所关心的目标不同,所以二者在信号处理上有较大差异,但也有其本质的联系,从而使兼容成为可能. 下面将分别加以分析.

2.1 AMTI 技术

由于雷达平台的运动将引起照射区内回波谱的平移和展宽,使固定 MTI 的杂波抑

1993-10-06 收到, 1994-02-01 定稿

赵志钦 男, 1969 年生, 博士生, 现主要从事自适应信号处理、机载 SAR 平台运动补偿和运动目标成像等领域的研究.

熊思民 男, 1965 年生, 博士生, 现主要从事星载、机载 SAR 信号处理和三维成像等领域的研究.

黄顺吉 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 现主要从事毫米波雷达、星载和机载 SAR 系统和微波成像系统等领域的研究.

制能力大为降低。所以,为了检测出强地杂波背景下的运动目标,有必要采用 AMTI 技术来消除由于运动而引起的平移和展宽的杂波回波。

图 1 是 AMTI 系统的原理框图,可用数学表达式表示为

$$y[n] = x[n-1] - W_{\text{opt}} \cdot x[n]. \quad (1)$$

令 $W_{\text{opt}} = \exp(j\varphi)$, 则该系统的传输函数为

$$|H(j\omega)| = |1 - \exp[-j(\omega/f_r + \varphi)]|, \quad (2)$$

其中 f_r 为脉冲重复频率 (PRF), 由(2)式可见,该系统在 $f = -(\varphi \cdot f_r)/(2\pi)$ 处有一凹口。为了使这一凹口跟踪平移了的杂波频谱的中心,根据最小功率准则得

$$W_{\text{opt}} = (\overline{x_2 x_1^*}) / (\overline{|x_1|^2}), \quad (3)$$

其中“*”表示共轭,“—”表示算术平均。

所以,该系统的对消比 CR 为

$$\text{CR} = (\overline{|x[n]|^2}) / (\overline{|y[n]|^2}) = (1 - |\rho|^2)^{-1}, \quad (4)$$

其中 $\rho = (\overline{x_2 x_1^*}) / [(\overline{|x_1|^2})^{1/2} \cdot (\overline{|x_2|^2})^{1/2}]$ 。 (5)

可见 CR 与 $|\rho|$ 有关,由于相邻两时刻的回波具有较强的相关性,即 $|\rho|$ 较大,所以 CR 也较大,这表明 AMTI 具有良好的抑制杂波的能力。

但单级 AMTI,其自适应凹口 -3dB 宽度为 $\text{PRF}/4$,为了检测出较大范围内运动速度的目标,我们希望采用较高 PRF。若 PRF 太低,容易使多普勒频率为 $n\text{PRF} + f_c$ 左右的运动目标落入杂波区(其中 n 为整数, f_c 为杂波中心),从而把运动目标信号当成杂波被抑制掉。

2.2 SAR 的信号处理

SAR 属脉冲体制雷达,其发射脉冲串 $f(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \rho(t - nT_r) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{rect}(t - n) \exp\{j[\omega(t - nT_r) - \phi(t - nT_r)]\}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\text{rect}(\cdot)$ 是脉冲宽度; $\phi(\cdot)$ 是脉冲内相位编码,一般采用线性调频调制 (LFM Chirp) 编码; ω 是载频; $T_r = 1/f_r$ 。于是,点反射目标信号可表示为

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot W_a[t - r(t)/c] \cdot \text{rect}[t - nT_r - 2r(t)/c] \\ &\quad \times \exp\{-j[4\pi r(t)/\lambda] - j\phi[t - nT_r - 2r(t)/c]\}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 σ 为点目标的雷达反射系数; c 为光速; $r(t)$ 为方位向 t 时刻点目标到载机的斜距; $W_a(\cdot)$ 为方位向的天线增益。将 t, nT_r 换成方位位置 x 和距离 r , 则 $s(t)$ 可用 $s(x, r)$ 表示为

$$s(x, r) = \sigma(x, r) W_r(r) \otimes h_1(x, r) \otimes h_2(x, r), \quad (8)$$

其中 $W_r(r)$ 为距离向的天线增益; $h_1(x, r)$, $h_2(x, r)$ 分别为方位、距离向的脉冲响应

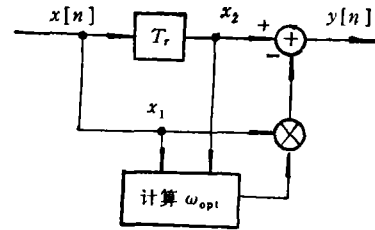


图 1 AMTI 系统原理图

函数.

$$h_1(x, r) = W_a(x) \exp[-j4\pi \cdot r(x)/\lambda] \cdot \delta[r - r(x)], \quad (9)$$

$$h_2(x, r) = a \cdot \delta(x) \cdot \text{rect}(r) \cdot \exp[-j\phi(r)], \quad (10)$$

其中 a 为常数.

SAR 成像的任务就是从 $s(x, r)$ 中提取 $\sigma(x, r)$, 这可用(11)式表示, 即

$$\hat{\sigma}(x, r) = [s(x, r) \otimes h_2^{-1}(x, r)] \otimes h_1^{-1}(x, r). \quad (11)$$

由此得 SAR 的信号处理框图, 如图 2 所示.

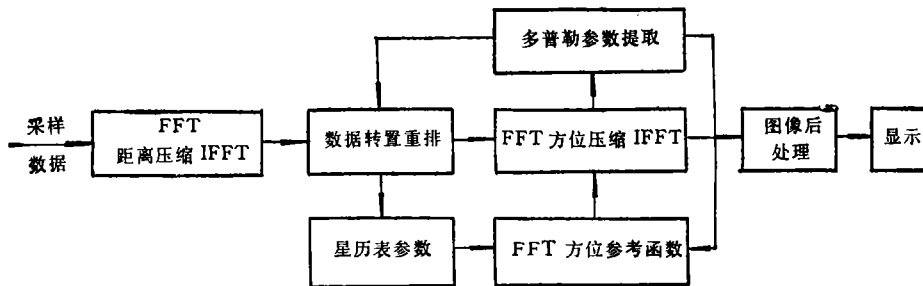


图 2 SAR 的信号处理框图

要得到正确的图像, 必须提供正确的参考函数。函数中 $h_2^{-1}(x, r)$ 由发射脉冲决定; $h_1^{-1}(x, r)$ 与载机的运动状态有关, 对运动目标, 它还与运动目标的状态有关; 所以, 用固定目标的参考函数来对运动目标成像必然引起图像质量下降, 出现散焦和定位误差。另外, 为确定参考函数, 必须求取多普勒质心 f_{dc} 。通常, 多普勒质心的估计多采用频域法, 如能差逼近法等, 这些方法计算量大。而由对 AMTI 的分析可知, 代表自适应凹口位置的加权因子 W_{opt} 代表回波谱的质心, 这样成像处理所需的多普勒质心可由 AMTI 提供 (12) 式给出了多普勒质心估计的数学表达式。

$$f_{dc} = -(f_r/2\pi) \cdot \text{arctg}(W_I/W_Q), \quad (12)$$

其中 W_I, W_Q 分别为 W_{opt} 的虚部和实部。计算机模拟结果表明^[5], 由 AMTI 提供的质心估计精度 $< 0.17\text{Hz}$, 该精度高于以前采用的频域法。这里体现了 AMTI 与 SAR 兼容的另一优点。但同时由于 AMTI 需采用较高的 PRF, 而 SAR 只需中、低 PRF, 两者对 PRF 的要求存在差异。为此, 下面我们提出解决该问题的办法和完整的兼容体制模型, 并论证其可行性。

3 AMTI 与 SAR 兼容性的研究^[6-9]

由 AMTI 的分析可得, 为留取更大的检测运动目标的范围, 在测距无模糊的条件下, 希望采用高的 PRF。对 SAR 来说, 其空间频谱的宽度远小于运动目标的多普勒频率, 它所需的 PRF 是在保证空间谱不混叠的情况下来选择。因此, AMTI 与 SAR 在 PRF 上的要求有差异。为此, 系统采用如图 3 所示的相干脉冲串列。每列共有 $M \cdot N$ 个脉冲, 其中每 M 个为一组。根据系统工作的需要, 各脉冲组可采用相同的或不同的 PRF。采用不同的 PRF 可达到利用参差重复频率消除盲速的效果, 但每个组内脉冲的 PRF 都

必须保持恒定。

PRF 的上限取决于成像测绘带宽所要求的无模糊距离范围和运动目标的多普勒频移, 最低 PRF 取决于合成孔径方位多普勒带宽。

对测绘带宽 $\Delta r = 18\text{km}$, 载机速度 $v = 70\text{m/s}$, 分辨力(单视) $2\text{m} \times 2\text{m}$ 的合成孔径雷达, 其最高允许的 PRF_{max} 为(低入射角 β_0 时)

$$\text{PRF}_{\text{max}} = c / (2 \cdot \Delta r \cdot \cos \beta_0) \approx c / (2 \cdot \Delta r) \approx 8.3\text{kHz}. \quad (13)$$

最低 PRF_{min} 为

$$\text{PRF}_{\text{min}} = v / \delta a = 35\text{Hz}. \quad (14)$$

速度为 $v = 20\text{km/h}$ 的目标, 其最大径向速度对应的多普勒频率为 ($\lambda = 0.03\text{m}$)

$$f = 2v_r / \lambda \approx 400\text{Hz}. \quad (15)$$

显然, 运动目标对应的多普勒频移与 SAR 的 PRF_{max} 并不矛盾, 且 PRF_{max} 与 PRF_{min} 之间的大间隔提供了选择 PRF 的灵活性。我们可针对两者的工作模式选择各自的 PRF (即采样率)。对 AMTI, 采用靠近 PRF_{max} 的采样率, 以便发现较为高速的

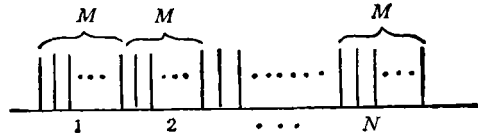


图 3 发射相干脉冲列示意图

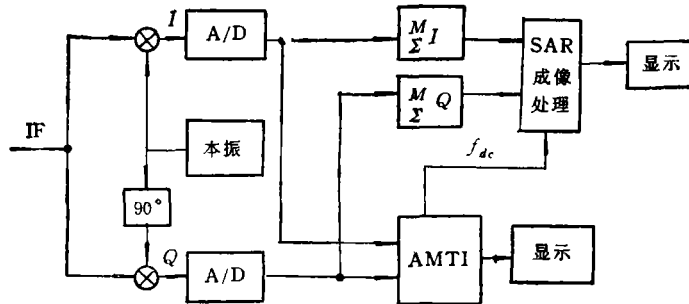


图 4 兼容系统框图

目标; 对 SAR 则采用略高于 PRF_{min} 的采样率。两种采样率之间的倍数为 M , 即每组脉冲中的脉冲个数 M 必须满足(16)式。

$$M \leq \text{PRF}_{\text{max}} / \text{PRF}_{\text{min}}. \quad (16)$$

经过上面的分析, 得到如图 4 所示的兼容系统框图。

我们再来分析该系统的性能。对 SAR 的成像能力已众所周知, 下面主要分析该体制中 AMTI 的杂波抑制能力。设载机与地面的位置关系如图 5 所示。载机高度 $h = 3\text{km}$, 地面距离 $l = 30\text{km}$, 结合前面的参数, 则天线波束宽度为

$$\theta_0 = (\lambda / D_s) \times 57.3^\circ = [\lambda / (2\delta a)] \times 57.3^\circ \approx 0.43^\circ. \quad (17)$$

入射角 $\beta_0 = \arctg(h/l) \approx 5.7^\circ$, 于是可得回波杂波谱的近似宽度 Δf_s 为

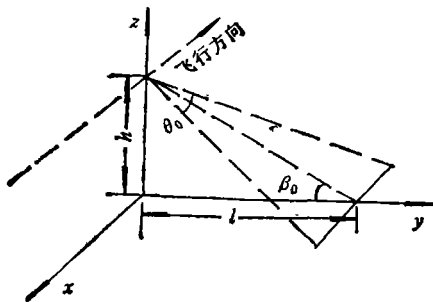


图 5 载机与地面的几何位置关系图

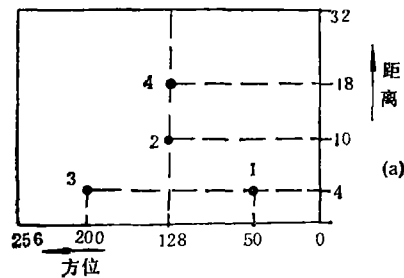
$$\Delta f_d = 2 \cdot (v_g/\lambda) \sin(\theta_0/2) \cos \beta_0 \approx 36\text{Hz}. \quad (18)$$

若选 $\text{PRF} = 1\text{kHz}$, 则 Δf_d 远小于 AMTI 的滤波器宽度, 因此 CR 可以很大, 计算机模拟的结果表明^[10], CR 可达 20dB 以上, 这样就起到了抑制杂波、发现动目标的效果。

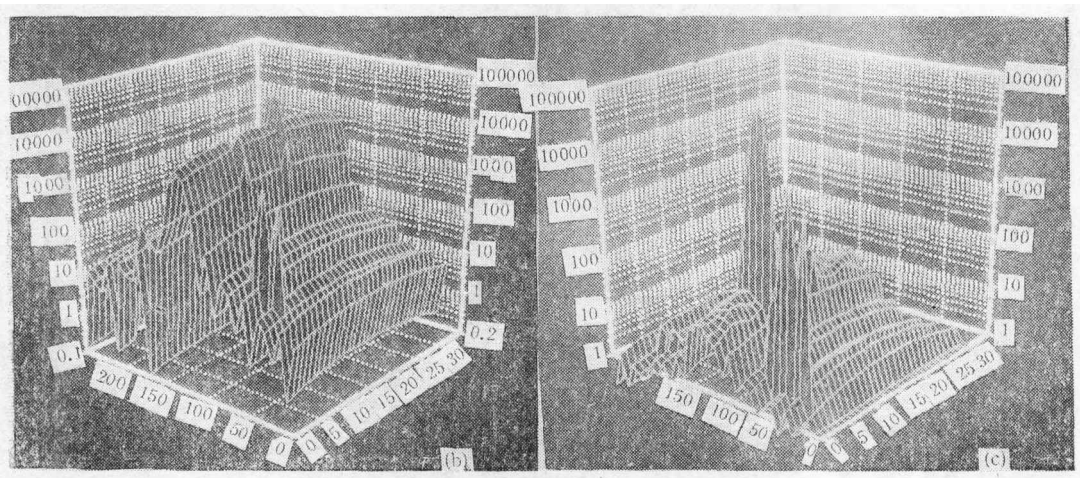
以上从理论上分析了这种兼容体制, 为进一步验证该系统, 下面我们进行了计算机模拟。

4 计算机模拟

为了说明该系统的兼容性和可行性, 计算机模拟时在大面积杂波背景下叠加了固定目标和运动目标。它们的相对位置关系如图 6(a)所示, 其中 1, 2 为运动目标; 3, 4 为固定目标。本次模拟中, 为了节省运算时间, 截取的数据量为 256×32 点; PRF 为 1024Hz ; $\lambda = 0.03\text{m}$; 目标 1, 2 对应的多普勒频移为 400Hz ; 信噪比分别为 10dB , 0dB ; 固定目标 3, 4 的信噪比分别为 3dB , 0dB ; $M = 16$ 。图 6(b) 是经 SAR 成像后的结果。从图中可得, 系统能对目标 3, 4 成像, 而运动目标 1 和 2 被淹没于杂波之中。图 6(c) 是经 AMTI 处理后的结果。它表明, AMTI 抑制了强地杂波和固定目标, 提高了运动目标的



(a) 目标的位置图



(b) 经 SAR 成像后的模拟结果

(c) 经 AMTI 后的模拟结果

图 6

信噪比,改善因子在 20dB 以上。

5 结 束 语

本文从分析 AMTI 技术和 SAR 成像处理入手,提出了 AMTI 与 SAR 兼容的系统框图;并由 AMTI 提供 SAR 成像的关键参数——多普勒质心;然后,分析了 PRF 这一关键参量的选取,解决了 AMTI 和 SAR 在选取 PRF 时存在差异的问题;最后,对该系统进行了计算机模拟。结果表明,该系统能对固定目标成像,且具有优良的动目标检测能力。另外,本文所提兼容模式只是我们所考虑的多种兼容模式中的一种。另一种对固定目标、运动目标分别成像、综合显示的工作模式则是我们下一步研究的目标。

参 考 文 献

- [1] Andrew G A. Platform Motion Compensation for AMTI Radar. EASCON'76 Record.
- [2] Frank F, Kretschmer J R, Lowis B L. IEEE Trans. on AES, 1978, AES-14(1): 165—171.
- [3] Wu C, Liu K Y, Jin M. IEEE Trans. on AES, 1982, AES-18(5):563—574.
- [4] 黄顺吉. 星载合成孔径成像处理和运动补偿研究总结报告. 863-308 课题报告,成都:电子科技大学电子工程系,1992.
- [5] 赵志钦,刘醒凡,顾德仁. 信号处理学报,1995,11(1):26—30.
- [6] Chen H C, Mcgille C D. IEEE Trans. on AES, 1992, AES-28(3): 895—901.
- [7] Morphet F N, Payne R W. Combined Moving Target Detection and Synthetic Aperture Radars. Proc. Military Microwave, 1986, 211—215.
- [8] Werness S, Carrara W, Joyce L, Franciak D. IEEE Trans. on AES, 1990, AES-26(1): 57—67.
- [9] Freeman A, Currie A. GEC Journal of Research, 1987, 5(2): 106—115.
- [10] 赵志钦,刘醒凡. 电子科技大学学报, 1993,22(5): 455—458.

THE ANALYSIS OF COMPATIBLE SYSTEM OF AMTI AND SAR

Zhao Zhiqin Xiong Simin Huang Shunji

(Department of Electronic Engineering, UEST of China, Chengdu 610054)

Abstract Based on the analysis of Adaptive Moving Target Indication (AMTI), and the signal processing of Synthetic Aperture Radar (SAR), a complete compatible system of AMTI and SAR is put forward. The compatibility and effectiveness of this system is proved in theory. The results of simulation show that this system not only has the good ability of imaging stationary targets but also has the ability of detecting moving targets under the background of strong clutter.

Key words Image processing, Reference function, Clutter suppression, Compatible system, Cancellation ratio