

双站逆合成孔径雷达成像理论研究

张亚标^{①②} 朱振波^{①②} 汤子跃^② 苑秉成^①

^①(海军工程大学 武汉 430033)

^②(空军雷达学院电子工程研究所 武汉 430010)

摘要 常规单站逆合成孔径雷达(ISAR)不能对沿雷达视线方向飞行的目标成像,收发分置的双站逆合成孔径雷达(双站ISAR)系统解决了以上问题。该文分析了双站ISAR目标回波的特点,研究了双站ISAR对目标成像时的成像原理、方位分辨力、目标尺寸限制和采样率要求,得到了严格数学解,最后给出了模拟飞机目标的成像结果。

关键词 双站ISAR, 方位分辨力, 采样率

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-0969-04

Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar Image Formation

Zhang Ya-biao^{①②} Zhu Zhen-bo^{①②} Tang Zi-yue^② Yuan Bing-cheng^①

^①(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

^②(Air Force Radar Academy, Wuhan 430010, China)

Abstract The use of a monostatic radar configuration limits the ability of an Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) system to image targets moving along the radar Line Of Sight (LOS). By employing bistatic geometries this limitation may be overcome. This paper analyzes the echo model of bistatic ISAR. The imaging theory, azimuth resolution, target size limitation and sampling rate of bistatic ISAR are studied in detail, and the analytical solutions are obtained. The computer simulation images are presented.

Key words Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar(Bistatic ISAR), Azimuth resolution, Sampling rate

1 引言

常规ISAR系统为收发合一的有源雷达,隐蔽性较差,因此易被敌方侦察发现并采取对抗措施,系统的工作性能和自我生存能力受到严重威胁。另外,为了实现对运动目标的高分辨力成像,ISAR一方面需要有较高的信噪比,同时还要要求目标相对于雷达视线方向(LOS)有转动(即视角变化),由于实际目标运动的非合作性,致使ISAR系统对目标的成像率不高(成像效果与目标机动情况关系很大),这在一定程度上影响了常规ISAR系统的实际应用。双站ISAR可解决常规单站ISAR系统所存在的问题,还可提高目标的成像概率,增大作用距离(在接收机前置的情况下),甚至提高对隐身目标的探测和成像能力^[1,2]。文献[3]对机载双站SAR系统进行了大量的研究,Palmer等人提出了利用水面反射实现双站ISAR的设想^[4],本文建立了收、发系统分置的双站ISAR模型,通常情况下发射系统可以放置在距离目标相对较远的位置上,无源ISAR接收系统则可放置在相对靠前的位置上,图1给出了一般陆基双站ISAR系统的构成示意图。本文主要分析了双站ISAR的回波模型,进而研究双站ISAR的成像原理、方位分辨力、目标尺寸限制和采样率要求。

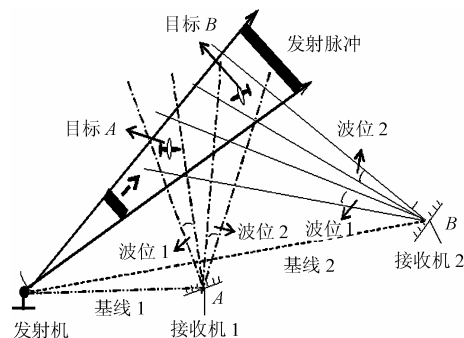


图1 陆基双站ISAR系统构成示意图

2 双站ISAR成像原理

双站ISAR成像也是利用距离多普勒成像原理,通过对宽带信号的距离压缩形成距离向的高分辨,得到一维距离像(或称目标回波的幅度包络)。在方位向上,同一距离单元内不同位置的点靠其相对于雷达旋转运动产生的多普勒频率进行分辨。

假设目标与雷达之间不存在平动分量,即认为可以非常理想地进行运动补偿,那么就可以利用图2来描述双站ISAR的成像机理,其中 R_x 、 T_x 分别表示双站ISAR的收、发系统, R_R 、 R_T 分别表示收、发系统到目标旋转中心 o 的距离矢量,其模值分别表示为 R_R 、 R_T , φ 为双基地夹角。

目标上任意散射点 P 用矢量 $\mathbf{r}_0(r_0, \theta)$ 表示, 则其到收、发系统的距离分别为 $|\mathbf{R}_R + \mathbf{r}_0|$, $|\mathbf{R}_T + \mathbf{r}_0|$, 设雷达的发射信号为 $s(t)$, 对应的频谱为 $S_r(f)$, 则目标回波:

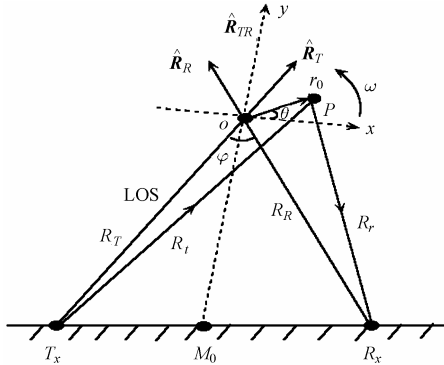


图2 双站 ISAR 几何结构

$$s_r(t) = \int_V g(\mathbf{r}_0) s(t - (|\mathbf{R}_R + \mathbf{r}_0| + |\mathbf{R}_T + \mathbf{r}_0|)/c) d\mathbf{r}_0 \quad (1)$$

式中 $g(\mathbf{r}_0)$ 为三维物体的散射强度, V 为三维目标的体积, c 为光速。若用 r_0 表示 $\mathbf{r}_0$ 的模, 则 $r_0 \ll \min(R_T, R_R)$, $|\mathbf{R}_R + \mathbf{r}_0|$ 、 $|\mathbf{R}_T + \mathbf{r}_0|$ 可近似表示为

$$\begin{cases} |\mathbf{R}_R + \mathbf{r}_0| = \sqrt{R_R^2 + r_0^2 + 2(\mathbf{R}_R \cdot \mathbf{r}_0)} \approx R_R + (\hat{\mathbf{R}}_R \cdot \mathbf{r}_0) \\ |\mathbf{R}_T + \mathbf{r}_0| = \sqrt{R_T^2 + r_0^2 + 2(\mathbf{R}_T \cdot \mathbf{r}_0)} \approx R_T + (\hat{\mathbf{R}}_T \cdot \mathbf{r}_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $(\cdot)$ 表示向量点积, 把式(2)代入式(1)并对其作傅里叶变换(FFT), 就可得到回波信号的频谱

$$S_r(f) = \iint_V g(\mathbf{r}) s\left(t - \frac{R_T + R_R}{c} - \frac{(\hat{\mathbf{R}}_T + \hat{\mathbf{R}}_R) \cdot \mathbf{r}_0}{c}\right) \cdot \exp(-j2\pi f t) d\mathbf{r}_0 dt \quad (3)$$

其中 $\hat{\mathbf{R}}_T = \mathbf{R}_T/R_T$, $\hat{\mathbf{R}}_R = \mathbf{R}_R/R_R$ 分别为距离矢量 $\mathbf{R}_R$, $\mathbf{R}_T$ 的单位矢量。 $\mathbf{R}_R$ 和 $\mathbf{R}_T$ 是时间的函数, R_R 和 R_T 的变化反映了目标在空间位置上的平动量。

假设发射脉冲比较短, R_R 和 R_T 在脉冲持续期间内近似不变, 则式(3)可近似为

$$S_r(f) = S(f) \exp\left[-j2\pi f \frac{(R_T + R_R)}{c}\right] W(f) \quad (4)$$

其中 $W(f)$ 为目标散射函数 $g(\mathbf{r}_0)$ 的空间频谱:

$$W(f) = \int_V g(\mathbf{r}_0) \exp\left[-j2\pi f \frac{K \hat{\mathbf{R}}_{TR} \cdot \mathbf{r}_0}{c}\right] d\mathbf{r}_0 \quad (5)$$

其中 $K = |\hat{\mathbf{R}}_T + \hat{\mathbf{R}}_R|$, $\hat{\mathbf{R}}_{TR}$ 为 $\hat{\mathbf{R}}_T$, $\hat{\mathbf{R}}_R$ 之和的单位矢量

$$\hat{\mathbf{R}}_{TR} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_T + \hat{\mathbf{R}}_R}{|\hat{\mathbf{R}}_T + \hat{\mathbf{R}}_R|} \quad (6)$$

它反映了收、发系统对目标共同作用的结果, 此时 $\hat{\mathbf{R}}_{TR}$ 的矢量方向(亦即是双基地夹角 φ 的角平分线方向)为双站模式观测目标时的等效纵向。

对式(4)进行距离压缩实现距离向高分辨, $S_r(f)$ 经过距离压缩处理后得到

$$S_0(f) = \frac{S_r(f)}{S(f)} = W(f) \exp\left[-j2\pi f \frac{(R_T + R_R)}{c}\right] \quad (7)$$

从而有

$$W(f) = S_0(f) \exp\left[j2\pi f \frac{(R_T + R_R)}{c}\right] \quad (8)$$

式中 $1/S(f)$ 为压缩滤波器传递函数。通常我们用压缩滤波器代替通常的匹配滤波器以获得最佳的距离分辨效果。由式(8)看出, 直接对距离向压缩后的回波信号进行快速傅里叶变换可以再现目标散射函数的空间谱结构。

由式(5)可以看出双站 ISAR 的成像效果与双基地夹角有关, 其角平分线为成像的距离向投影轴, 等效为单站情形下的雷达视线方向, 与单站相比, 双站 ISAR 的成像结果有一定角度的倾斜, 倾斜角近似为双基地夹角的一半。如图2所示双站 ISAR 对目标的观测坐标系可等效于位于点 M_0 处的单站 ISAR 观测坐标系 xoy , 点 M_0 为双基地角平分线与双基地基线的交点。

3 双站 ISAR 的特性分析

3.1 分辨力

由以上分析, 以单位矢量 $\hat{\mathbf{R}}_{TR}$ 所指方向为 y 轴, 垂直于该方向为 x 轴建立如图2所示的直角坐标系 xoy , 坐标系平面位于收发双站视线角(LOS)所组成的平面内。设目标以均匀角速度 ω 绕坐标原点 O 旋转, 目标上某一点 P 在起始时刻($t=0$)与坐标原点之间的距离为 r_0 , 与 x 轴的夹角为 θ , 则 t 时刻该点到双站的距离分别为^[5]:

$$R_t = \sqrt{R_T^2 + r_0^2 + 2R_T r_0 \sin(\theta + \varphi/2 + \omega t)} \quad (9)$$

$$R_r = \sqrt{R_R^2 + r_0^2 + 2R_R r_0 \sin(\theta - \varphi/2 + \omega t)} \quad (10)$$

如果雷达与目标之间的距离远大于目标的几何尺寸($R_T, R_R \gg r_0$), 那么, 可以得到下面一个较好的近似表达:

$$R_t \approx R_T + x_0 \sin(\varphi/2 + \omega t) + y_0 \cos(\varphi/2 + \omega t) \quad (11)$$

$$R_r \approx R_R + x_0 \sin(-\varphi/2 + \omega t) + y_0 \cos(-\varphi/2 + \omega t) \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} x_0 = r_0 \cos \theta \\ y_0 = r_0 \sin \theta \end{cases} \quad (13)$$

则回波的多普勒频率可以表示为

$$f_d = \frac{dR_t}{\lambda dt} + \frac{dR_r}{\lambda dt} = \frac{x_0 \omega}{\lambda} \cos\left(\frac{\varphi}{2} + \omega t\right) - \frac{y_0 \omega}{\lambda} \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \omega t\right) + \frac{x_0 \omega}{\lambda} \cos\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right) - \frac{y_0 \omega}{\lambda} \sin\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (14)$$

其中 λ 为雷达信号波长。假设转动角度很小, 则回波的多普勒频率变化可简化为

$$\Delta f_d = \frac{2x_0 \omega}{\lambda} \cos(\varphi/2) \quad (15)$$

实际能达到的多普勒频率分辨率是由相干积累时间 T 决定的, 并且有

$$\Delta f_d = 1/T \quad (16)$$

则可得到方位向分辨率

$$\rho_x = \frac{\lambda}{2\omega T \cos(\varphi/2)} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta \cos(\varphi/2)} \quad (17)$$

特别当 $\varphi=0$ 时, 也就是单站模式下, 有

$$\rho_x = \lambda/(2\Delta\theta) \quad (18)$$

定义 $k = \frac{\text{双站模式分辨率}}{\text{单站模式分辨率}}$ 为相对横向分辨率, 则有

$$k = \frac{\lambda}{2\Delta\theta \cos(\varphi/2)} \bigg/ \frac{\lambda}{2\Delta\theta} = \frac{1}{\cos(\varphi/2)} \quad (19)$$

双站 ISAR 距离向分辨率通常是利用发射大带宽信号获得, 其距离分辨率为

$$\rho_r = c/(2B) \quad (20)$$

由式(19)可以看出, 双站 ISAR 工作模式下, 目标的横向分辨率不再是常数, 它与双基地夹角的大小有关, 即与收、发双站与目标的空间几何位置关系相关。图3给出了单个散射点在不同双基地角下观测时的相对分辨率曲线, 可以看出当双基地夹角在锐角区域时, 目标的相对横向分辨率 $k \approx 1$ 变化不大, 在钝角区域其相对横向分辨率随着双基地夹角的增大而变差, 图中双基地夹角的变化范围为 $0^\circ \leq \varphi \leq 170^\circ$ 。

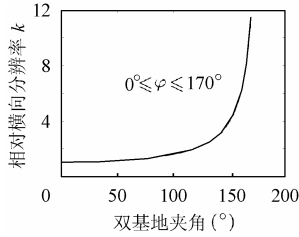


图3 单、双基地夹角与相对分辨率 k 的关系

3.2 目标尺寸限制

在一定条件下, 双站 ISAR 所观察的目标可用分布的散射点表示, 目标转动时它上面的散射点会随着转动, 在观测过程中认为将散射点的走动没有超出分辨单元(单位纵向距离和单位横向距离)。若对大目标作高分辨成像, 上述近似不成立。设目标尺寸为 $L_x \times L_y$, 分辨率为 $\rho_x \times \rho_y$, 则不产生纵向和横向距离走动的条件分别为

$$L_x \Delta\theta \leq \rho_y \text{ 和 } L_y \Delta\theta \leq \rho_x \quad (21)$$

由于 $\Delta\theta = \lambda/2\rho_x \cos(\varphi/2)$, 则可以得到目标尺寸限制与分辨率的关系

$$L_x \leq 2\rho_x \rho_y \cos(\varphi/2) / \lambda \quad (22)$$

$$L_y \leq 2\rho_x^2 \cos(\varphi/2) / \lambda \quad (23)$$

由上面分析可以看出, 不发生跨距离单元走动的目标尺寸受制于成像分辨率。若 $\varphi = 45^\circ$, $\lambda = 3\text{cm}$, $\rho_x = \rho_y = 0.4\text{m}$, 则目标尺寸的限制为

$$\begin{cases} L_x \leq 9.8547\text{m} \\ L_y \leq 9.8547\text{m} \end{cases} \quad (24)$$

对于常规 ISAR, 雷达参数和分辨率满足上述要求时, 目标尺寸的限制为

$$\begin{cases} L_x \leq 10.07\text{m} \\ L_y \leq 10.07\text{m} \end{cases} \quad (25)$$

显然, 与单站 ISAR 系统相比较, 相同目标分辨率下, 散射点不发生走动的目标尺寸限制更大些。当目标尺寸超过上述限制时会使得图像四周出现模糊。实际中, 飞机、舰船等目标的尺寸一般大于此值, 故有可能发生散射点模型破坏而使散射点变动的情况。

3.3 采样率要求

如前所述, 双站 ISAR 的横距分辨率和散射点纵向走动取决于总的转角 $\Delta\theta$ 和双基地夹角 φ , 而横向采样次数 N 需要保证图像在横向不发生模糊, 采样率必须满足奈奎斯特准则, 在一次转角 $\delta\theta = \Delta\theta/N$, 目标 L_x 两端点相位差之差必须小于 2π , 亦即

$$N \geq \frac{2\Delta\theta \cos(\varphi/2)}{\lambda} L_x = L_x / \rho_x \quad (26)$$

4 成像仿真

双站 ISAR 系统成像仿真参数如表1所示。

图4给出的是双站 ISAR 收、发系统与飞机目标的几何位置关系, y 轴方向为发射波束中心指向目标的方向, 其中目标以速度 $v=100\text{m/s}$ 匀速沿 y 轴方向飞行, φ 为双基地夹角, 定义 β 为不同接收站位置双站 ISAR 系统的目标成像结果相对于单站 ISAR 沿 y 轴方向对目标成像结果的倾斜角。图5是目标散射点的分布模型, 其坐标 (x, y) 属于图4中所示坐标系。

表1 双站 ISAR 系统仿真参数

参数	变量名	变量值
信号载频	f_0	2GHz
信号带宽	B	100MHz
脉冲重复频率	PRF	60Hz
脉冲带宽	τ	6μs
初始发射距离	R_{T0}	10km
收发系统间距	l	1~12km
双基地夹角	φ	$0^\circ \sim 50.2^\circ$

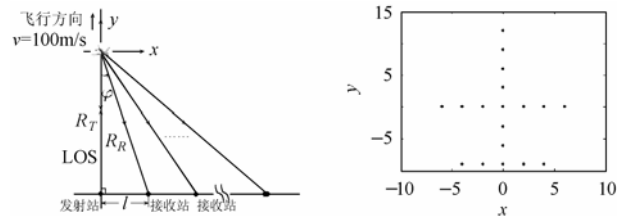


图4 收、发站与飞机目标的几何位置

图5 飞机目标的几何形状

图6给出了双站 ISAR 不同接收位置时飞机目标的仿真成像结果。图6(a)为单站 ISAR 对目标的成像结果, 可以看出单站 ISAR 对沿雷达视线(LOS)方向飞行的目标不能实现

方位分辨,得不到距离-多普勒的二维图像。图 6(b)–6(f)为双站 ISAR 在不同接收位置得到的二维图像,双站 ISAR 实现了对沿 LOS 方向飞行目标的方位高分辨。随着双基地夹角的增大,图 6(f)开始产生模糊,这是由于出现了跨单元距离走动的原因。在实际中对飞机和舰船等大目标观测时,很容易产生跨距离单元走动的情况,需要不断改进成像。

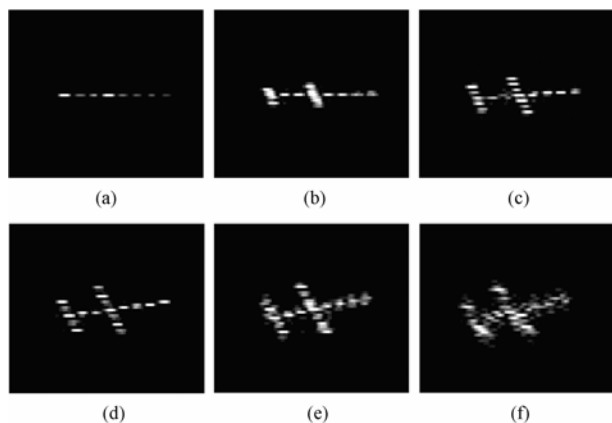


图 6 飞机目标的仿真成像结果

- (a) $l = 0, \varphi = 0, \beta = 0$ (b) $l = 2\text{km}, \varphi = 11.3^\circ, \beta = 5.7^\circ$
 (c) $l = 4\text{km}, \varphi = 21.8^\circ, \beta = 10.9^\circ$ (d) $l = 6\text{km}, \varphi = 31.0^\circ, \beta = 15.5^\circ$
 (e) $l = 8\text{km}, \varphi = 38.6^\circ, \beta = 19.3^\circ$ (f) $l = 12\text{km}, \varphi = 50.2^\circ, \beta = 25.1^\circ$

5 结束语

常规 ISAR 系统为收发合一的有源雷达,隐蔽性较差,成像效果与目标机动情况关系很大,对沿 LOS 方向飞行的目标无法成像,这些在一定程度上影响了常规 ISAR 系统的实际应用。双(多)站 ISAR 系统收、发分置,能够获取丰富的目标散射信息,并且在接收回波能量上也有着较大优势,这

在一定程度上弥补了单站 ISAR 系统的不足。

本文从收、发分置的双站 ISAR 模型出发,研究了双站 ISAR 成像原理及成像分辨力等相关特性,仿真结果证明了双站 ISAR 的可行性。可以预见,双(多)站 ISAR 在未来对抗与反对抗的军事斗争中将扮演重要的角色。

参 考 文 献

- [1] Delise G Y, Wu H. Moving target imaging and trajectory computation using ISAR. *IEEE Trans on AES*, 1994, 30(3): 887–889.
- [2] Chen V C, Qian S. Joint. time-frequency analysis for radar range-Doppler imaging. *IEEE Trans. on AES*, 1998, 34(2): 486–499.
- [3] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003: 20–50.
- [4] Mr. Palmer J, Wedgetail TRDC, *et al.*. Airborne ISAR Imaging using the emulated bistatic radar system. (EUSAR'04), Ulm, Germany, May 2004, Vol.1, 375–378.
- [5] Giovanni Corsin, Anna Vaccarelli. The resolution capabilities in inverse synthetic aperture radar. *Alta Frequenza*, March–April 1989, 58(2), 195–203.

- 张亚标: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为 SAR/ISAR 系统及成像技术.
 朱振波: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为双站 SAR、ISAR 系统及成像技术.
 汤子跃: 男, 1966 年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 从事合成孔径雷达系统及微波成像新技术的研究.