

## 机载双通道 SAR/DPCA 误差分析

杨贤林 潘志刚 沈汀  
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要:** SAR/DPCA技术是一种简单实用的多通道SAR运动目标检测方法, 实际应用中会受到各种误差因素的限制, 其中影响算法性能最大的两类误差是载机速度误差和通道失衡。该文详细地分析了这两类误差因素对SAR/DPCA算法性能的影响, 建立了误差分析模型, 针对实际参数给出了误差分析的结果, 并确定了一定误差条件下的系统可检测速度范围、盲速和最小可检测速度。

**关键词:** SAR/DPCA; 误差分析; 盲速; 最小可检测速度

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-536-04

## Error Analysis for Airborne Dual-Channel SAR/DPCA System

Yang Xian-lin Pan Zhi-gang Shen Ting

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

**Abstract:** SAR/DPCA(Displaced Phase Center Antenna) technique is a simple and practical method of multi-channel SAR/GMTI(Graund Moving Target Indication), but in practice it is limited by some kinds of errors, in which antenna phase center velocity error and channel mismatch are the most important errors. In this paper, the error analysis model is founded and the loss of moving target detection performance is analyzed under the circumstance of antenna phase center velocity error or channel mismatch. The error analysis results are shown on the figures and the range of detectable velocity, blind velocity and minimum detectable velocity are confirmed on the basis of actual parameters of dual-channel SAR/DPCA system.

**Key words:** SAR/DPCA(Displaced Phase Center Antenna); Error analysis; Blind velocity; Minimum detectable velocity

### 1 引言

双通道SAR距离多普勒数据域DPCA(Displaced Phase Center Antenna)算法<sup>[1]</sup>是一种简单, 实用性强的DPCA算法。该算法是一种简单的两路信号相减取模的理论模型, 两路信号的相似程度决定了杂波抑制效果, 相似程度高对应的杂波抑制效果好, 相似程度低则对应的杂波抑制效果差。从算法的角度, 两通道数据的相似性由数据域SAR图像的精度和相位补偿的精度所决定。提高两通道数据的相似性更多的取决于系统本身的性能与参数, 如SAR系统误差、SAR成像精度、基线长度、载机速度和脉冲重复频率的误差、天线方向图的不一致性、通道失衡等都是影响系统杂波抑制性能的因素。分析这些误差因素并设法降低它们对检测性能的影响是SAR/DPCA系统设计的重点。

SAR系统误差与SAR成像精度属于SAR研究的范畴, 可参阅相关资料<sup>[2]</sup>。数据多普勒域DPCA处理无需满足DPCA条件, 在杂波抑制的实现过程中, 脉冲重复频率对算法性能没有显性的影响, 所以可将脉冲重复频率对DPCA系统检测性能的影响放到SAR系统中去研究。与载机速度误差和通道

失衡相比, 基线长度误差和天线方向图的不一致性对检测性能的影响要小得多<sup>[3]</sup>, 所以本文的误差分析主要考虑载机速度误差和通道失衡。

对SAR/GMTI系统而言, 雷达接收机内部所产生的噪声不是主要干扰源, 主要干扰源是目标所在地面大量的背景杂波<sup>[4]</sup>。系统噪声可以模拟为叠加在背景杂波上面的白噪声, 下面的研究中只考虑背景杂波, 忽略系统噪声的影响。

表征DPCA运动目标检测性能的3个重要的参数是改善因子(IF), 盲速和最小可检测速度(MDV), 这些参数决定了系统可检测运动目标的速度范围<sup>[5]</sup>。本文将结合实际SAR参数分析载机速度误差和通道失衡对以上3个参数的影响, 分析时不考虑系统噪声和杂波内部运动的影响。

### 2 理论模型

对双通道SAR/GMTI系统, 考虑一种简单实用的天线配置方式: 天线的全孔径发射电磁波, 对称分布在全孔径两侧的前后两个子孔径同时接收回波, 前向孔径为A1, 后向孔径为A2。设两个子孔径的距离(等效于天线基线长度)为d, 不考虑天线加权的影响, 考虑运动目标速度比载机速度小很多, 可写出单位后向散射系数地面运动点目标的多普勒域回波矢量近似为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} S_{\omega 1}(\omega, \vartheta) \\ S_{\omega 2}(\omega, \vartheta) \end{pmatrix} &= G_A \sqrt{\frac{\lambda R_h}{2v_R^2}} \exp\left(j\frac{\pi}{4}\right) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}\left(2R_h + \frac{d^2}{16R_h} - \frac{2v_r^2 R_h}{v_R^2}\right)\right] \exp\left(j\frac{v_r R_h}{v_R^2} \omega\right) \exp\left(j\frac{\lambda R_h}{8\pi v_R^2} \omega^2\right) \\ &\quad \cdot \begin{pmatrix} G_{A1} \exp\left(j\frac{\pi v_r d}{\lambda v_R}\right) \exp\left(j\frac{d}{4v_R} \omega\right) \\ G_{A2} \exp\left(-j\frac{\pi v_r d}{\lambda v_R}\right) \exp\left(-j\frac{d}{4v_R} \omega\right) \end{pmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

式中  $G_A$ ,  $G_{A1}$  和  $G_{A2}$  分别为  $A$  的发射方向图,  $A1$  和  $A2$  的回程方向图;  $\vartheta = (v_r, v_y, y_0) = (v_r, v_y, 0)$  为目标的运动参数, 不妨取目标的初始方位位置  $y_0 = 0$ ;  $v_R$  为载机速度,  $v_r$  为运动目标斜距向速度;  $\lambda$  为载波波长,  $R_h$  为目标的正侧视斜距,  $\omega$  为多普勒角频率。

式(1)表明天线回程方向图、基线长度和载机飞行速度都会影响系统检测参数。其中前向天线和后向天线回程方向图的不一致会造成两通道回波幅度的失衡, 基线长度和载机飞行速度的误差会造成相位的失衡, 幅度和相位的改变同时也会影响系统盲速。

另外, 在式(1)中, 信号表达式是在两路通道完全均衡的情况下得到的。在实际的系统中, 完全一致的两路通道是不存在的, 不同的通道会不可避免地引入不同的幅度误差和相位误差, 若被引入的误差足够大, 就会破坏信号间的相关性, 造成杂波抑制的性能下降, 甚至无法抑制。

在以下的分析中忽略天线回程方向图的不一致性, 即  $G_{A1} = G_{A2}$ , 记  $G_A G_{A1} = G_A G_{A2} = G$ ; 并且不考虑基线长度  $d$  的误差。

### 2.1 载机速度误差分析

在理想条件下, 式(1)经过相位补偿和 DPCA 处理后得

$$\begin{aligned} |I(\omega, \vartheta)| &= \left| S_{\omega 1}(\omega, \vartheta) \exp\left[-j\frac{d}{4v_R} \omega\right] - S_{\omega 2}(\omega, \vartheta) \right. \\ &\quad \left. \cdot \exp\left(j\frac{d}{4v_R} \omega\right) \right| = G \sqrt{\frac{\lambda R_h}{2v_R^2}} \left| 2 \sin\left(\frac{\pi v_r d}{\lambda v_R}\right) \right| \quad (2) \end{aligned}$$

对静止目标, 式(1)结果为零, 表明静止目标被完全抵消; 对运动目标, 抵消后的幅度保留是一个呈周期变化的  $\sin$  函数, 可以称其为运动目标幅度保留的尺度函数。

在实际的 SAR 成像过程中, 载机速度矢量会经常偏离航迹, 造成水平垂直于航迹的速度分量, 风速的影响会造成载机的上下波动, 使得载机速度存在纵向分量, 实际中这些额外的速度分量和速度大小的波动都会造成成像误差, 对运动目标的成像更是造成不可预见的结果。

设载机飞行速度误差为  $\Delta v_R$ , 考虑该误差对系统 IF 的影响, 则式(1)经过相位补偿和 DPCA 处理后得

$$\begin{aligned} \text{AMP}_{\text{TR1}} &= G \sqrt{\frac{\lambda R_h}{2v_R^2}} \left| 2 \sin\left(\frac{\pi v_r d}{\lambda v_R(1 + \Delta v_R/v_R)} - \frac{d \Delta v_R/v_R}{2v_R(1 + \Delta v_R/v_R)} \omega\right) \right| \quad (3) \end{aligned}$$

误差存在时的杂波残留为

$$\text{AMP}_{\text{CR1}} = G \sqrt{\frac{\lambda R_h}{2v_R^2}} \left| 2 \sin\left(\frac{d \Delta v_R/v_R}{2v_R(1 + \Delta v_R/v_R)} \omega\right) \right| \quad (4)$$

不考虑杂波内部运动的情况下, 系统 IF 可表示为

$$\begin{aligned} \text{IF}_1(v_r, \Delta v_R/v_R, \omega) &= \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi v_r d}{\lambda v_R(1 + \Delta v_R/v_R)} - \frac{d \Delta v_R/v_R}{2v_R(1 + \Delta v_R/v_R)} \omega\right)}{\sin\left(\frac{d \Delta v_R/v_R}{2v_R(1 + \Delta v_R/v_R)} \omega\right)} \right| \quad (5) \end{aligned}$$

式(5)是研究载机速度误差对系统 IF 影响的基本公式。

在不考虑垂直于航迹的载机速度分量的情况下, 图 1 给出了一定参数下的系统 IF 随载机速度相对误差的变化曲线, 在一定条件下, 该曲线同样满足小斜距向速度的目标对误差的敏感程度大的规律。

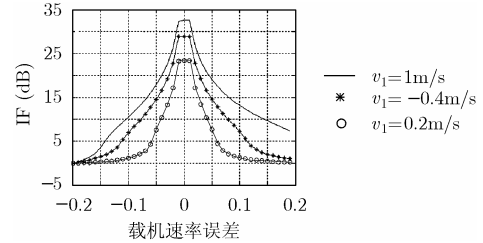


图 1 系统 IF 随载机速度相对误差的变化曲线

载机速度误差造成的相位变化, 会导致系统的盲速有所改变, 盲速不再仅仅是一个点, 而是基线长度误差和多普勒频率的函数, 由式(3)可得此时的盲速区间满足:

$$\begin{aligned} v_{\text{blind1}}(n, \Delta v/v, \omega) &= n \frac{\lambda v_R(1 + \Delta v/v)}{d} + \frac{\lambda \cdot \Delta v/v}{2\pi} \omega, \\ n &\in \mathbb{Z} \quad (6) \end{aligned}$$

在距离多普勒域内, 每个点目标的频谱宽度是整个的多普勒带宽, 几个多普勒频点上信号的完全对消不会影响一个目标的检测, 但由载机速度误差造成的盲速都在该区间内。

### 2.2 通道失衡分析

以通道 2 为参考通道, 假设式(1)中的通道 1 存在幅度误差  $A$  和相位误差  $\phi$ , 经过相位补偿 DPCA 处理后的信号为

$$\begin{aligned} \text{AMP}_{\text{TR2}} &= \left| S_{\omega 1}(\omega, \vartheta) A \exp(j\phi) \exp\left[-j\frac{d}{4v_R} \omega\right] - S_{\omega 2}(\omega, \vartheta) \exp\left(j\frac{d}{4v_R} \omega\right) \right| \\ &= G \sqrt{\frac{\lambda R_h}{2v_R^2}} \left| A \exp(j\phi) \exp\left(j\frac{2\pi v_r d}{\lambda v_R}\right) - 1 \right| \quad (7) \end{aligned}$$

取  $v_r = 0$  代入上式, 得

$$\text{AMP}_{\text{CR2}} = G \sqrt{\frac{\lambda R_h}{2v_R^2}} |A \exp(j\phi) - 1| \quad (8)$$

系统 IF 可用下式表征:

$$IF_2(v_r, A, \phi) = \left| \frac{A \exp(j\phi) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{v_r d}{v_R}\right) - 1}{A \exp(j\phi) - 1} \right| \quad (9)$$

根据上式可绘出系统 IF 随幅度失配和相位失配的变化曲面, 参见图 2。图中确定目标的斜距向速度为 0.8m/s, 当通道的幅度失配  $A=1.6$ , 相位失配  $\phi = 25^\circ$  时, 系统 IF 约为 10dB。

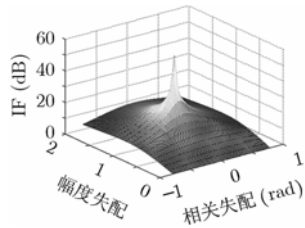


图 2 系统 IF 随通道失配的变化曲线

在固定幅度失配的情况下, 图 3(a)给出了不同斜距向速度目标的 IF 随相位失配的变化曲线, 尽管曲线的变化规律不是很明显, 在特定速度范围内, 曲线还是大体上遵循快速目标受误差影响小的规律。在固定相位失配的情况下, 图 3(b)给出了不同斜距向速度目标的 IF 随幅度失配的变化曲线, 在一定的速度范围内, 该曲线明确地反映了快速目标受误差影响小的规律。

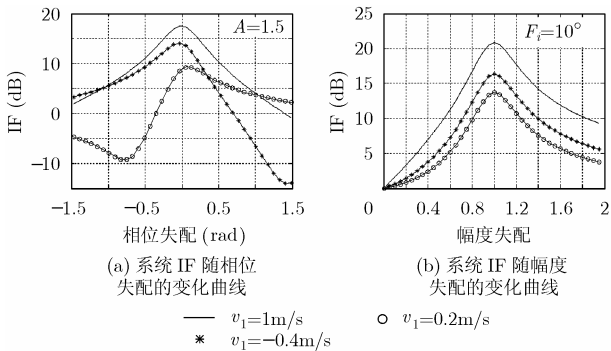


图 3 系统 IF 随通道失配的变化曲线

在实际的 SAR/GMTI 系统设计中, 通道失配造成的 IF 损失、载机速度范围和关注的运动目标范围都可以事先确定, 根据这些参数可以设计合理合适的幅度失配和相位失配以达到 SAR/GMTI 系统设计的目标。设计时应尽量使所关注的目标速度范围内的 IF 随通道失配的变化曲线趋于一致性, 规律化, 以减少出现奇异速度点的可能性。

随机相位噪声和幅度噪声的引入, 同样会使系统的盲速发生变化, 由式(7)可得, 当幅度均衡相位失衡时产生的盲速区间满足

$$v_{\text{blind}2} = (2k\pi - \phi) \frac{\lambda v_R}{2\pi d}, \quad k \in \mathbb{Z} \quad (10)$$

### 3 误差分析的计算机仿真

给定的 SAR 系统参数见表 1, 根据表内 SAR 几何参数,

表 1 SAR 系统有关参数

载机		SAR	
飞行速度	200~300m/s	方位向分辨率	1m
飞行高度	10~15km	距离向分辨率	1m
正侧视斜距	50~100km	发射信号波长	3cm
		发射信号脉宽	60 $\mu$ s
		基线长度	0.7m

可认为地面运动目标的距离向速度与斜距向速度近似相等。

选取参数时, 为了减小盲速区, 尽量使尺度函数的周期大, 尽量使关注速度范围包含的盲速点少; 为了提高杂波抑制后得 SCR, 尽量使关注的速度范围靠近尺度函数的最大值。为了减小盲速区, 选较高的载机飞行速度 290 m/s, 由 DPCA 条件<sup>[6]</sup>初步计算系统的脉冲重复频率为  $PRF = 829m, (m \in \mathbb{Z})$ 。SAR 系统 PRF 应满足<sup>[7]</sup>

$$B_d < PRF < \frac{c}{2(R_{\text{max}} - R_{\text{min}})} \quad (11)$$

其中  $B_d$  为多普勒带宽,  $R_{\text{max}}$  和  $R_{\text{min}}$  分别为正侧视斜距的最大值和最小值,  $c$  为光速。在方位向分辨率为 1m 时系统多普勒带宽仅为 290Hz, 为了减少系统的盲速点并消除 SAR 系统方位向模糊, 取  $m=2$ , 系统 PRF 的标称值设计为 1660Hz。

感兴趣的地面运动目标距离向速度范围为 55~125km/h(15.3~34.7m/s), 目标检测尺度函数的最大值位于 (参见图 4)

$$v_r = \frac{2k+1}{2} \frac{\lambda v_R}{d} \approx 6.2(2k+1), \quad k \in \mathbb{Z}^{\dagger} \quad (12)$$

依次为 6.2 m/s, 18.6 m/s, 31.0 m/s, ...。系统盲速点位于

$$v_r = n \frac{\lambda v_R}{d} \approx 12.4n, \quad n \in \mathbb{Z}^{\dagger} \quad (13)$$

依次为 12.4 m/s, 24.8 m/s, 37.2 m/s, ...。由于雷达参数的限制, 盲速 24.8 m/s 落入关注的目标速度范围。要使得感兴趣的速度范围内不存在盲速点, 可以通过提高发射信号波长、提高载机飞行速度或减小基线长度达到。

不考虑运动目标的距离徙动造成的散焦对 SCR 的影响, 仅考虑误差效应, 首先分析载机速度误差对检测性能的影响。地速跟踪是运动补偿系统的重要组成部分, 通过对系统 PRF 的调节, 使得 SAR 系统获得近似均匀采样的回波信号。可以这样认为, 具有运动补偿功能的机载 SAR 地面目标数据采集系统等效于载机作近似匀速直线运动的 SAR 地面目标数据采集系统。设地速跟踪装置对载机速度测量的相对误差在区间  $[-5\%, 5\%]$  之内, 由式(6)估算出盲速大致存在于区间  $[22.37, 27.30]$ , 再根据式(5)绘出基线长度误差区间内最小 IF 与目标斜距向速度的关系如图 5 所示。可见, 当载机速度的相对误差达到 5% 时, 对系统改善因子的影响是很大的, 并且加大了系统的盲速区间。

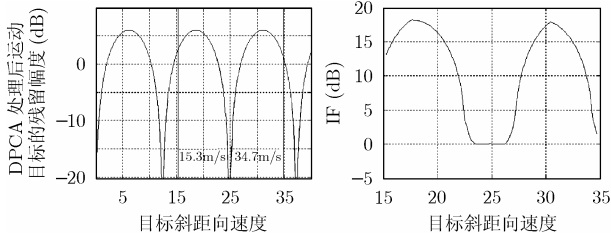


图4 目标幅度保留的尺度函数曲线

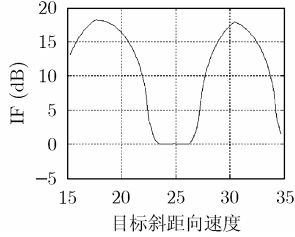


图5 载体速度误差对 IF 的影响

考虑通道幅度和相位误差对系统性能的影响, 设经过通道均衡后通道间仍有  $\pm 10^\circ$  的均匀分布的随机相位误差和  $\pm 10\%$  的均匀分布的随机幅度误差。在幅度误差为零的前提下, 由式(10)估算出盲速大致存在于区间[24.51, 25.20]。再由式(9)绘出通道失衡区间内最小 IF 与目标斜距向速度的关系如图 6 所示。可见, 通道失衡对系统改善因子的影响也是很大的, 同时也加大了盲速区间。

比较图 5, 图 6 可知, 给定误差条件下, 载体速度误差所造成的盲速区最大, 也是导致系统改善因子下降的最主要因素。图 4 中, 在关注的速度范围内, 系统的盲速区约为 [23.0m/s, 26.5 m/s], 即 [82.8 km/h, 95.4km/h]; 若 DPCA 处理后的距离多普勒域图像采用单元平均选大 CFAR 处理, 则虚警率为  $10^{-6}$  时所需的数据域图像 SDR(信扰比)为 12dB<sup>[4]</sup>, 此时系统可检测的速度范围是 [15.3m/s, 21.5m/s]  $\cup$  [28.0m/s, 33.3m/s], 即 [55.0km/h, 77.4km/h]  $\cup$  [100.8km/h, 119.9km/h] (参见图 7), 并由此可估算系统最小可检测斜距向速度约为 3.2m/s(11.5km/h)。

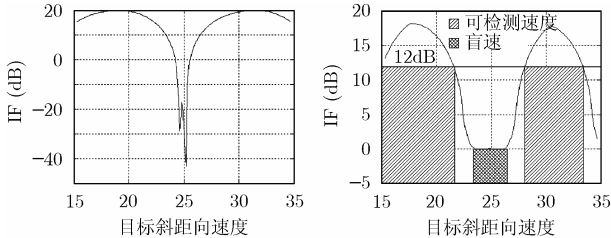


图6 通道失衡对 IF 的影响 图7 系统可检测速度和盲速区间

### 4 结束语

文中提出了基于数据多普勒域 SAR/DPCA 杂波抑制算法的误差分析模型, 研究了载体速度误差和通道失衡对系统改善因子和盲速的影响, 说明运动补偿和通道均衡系统的性能是决定系统性能的最重要因素。结合实际 SAR/DPCA 系统参数, 分析了系统盲速和 IF, 给出了系统可检测速度范围, 盲速和系统最小可检测速度。

### 参考文献

- [1] Gierull C H and Sikaneta I C. Raw data based two-aperture SAR ground moving target indication, Proc. of IGARSS'03, Toulouse, France, 2003: 1032-1034.
- [2] Curlander J C and McDonough R N. Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing, John Wiley & Sons, INC., 1991: 163-172.
- [3] 杨贤林. 机载双通道 SAR 地面运动目标检测成像技术研究. [硕士学位论文], 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [4] 何友, 关键, 彭应宁, 陆大绾. 雷达自动检测和恒虚警处理, 北京, 清华大学出版社, 1999.
- [5] Klemm R. Space-Time Adaptive Processing: Principles and Applications. London, UK: IEE Press, 1998.
- [6] Lightstone L, Faubert D, and Rempel G. Multiple phase centre DPCA for airborne radar. Proceedings of the 1991 IEEE National Radar Conference, 1991: 36-40.
- [7] 禹卫东, 合成孔径雷达信号处理研究. [博士学位], 南京: 南京航空航天大学, 1997.

杨贤林: 男, 1973年生, 硕士生, 研究方向为SAR信号处理、SAR运动目标检测和成像。  
 潘志刚: 男, 1976年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为SAR图像处理、信源编码和数据压缩。  
 沈汀: 男, 1965年生, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为SAR系统设计、平台控制和运动补偿。