

一种机载三通道 GMTI 实时信号处理方法

邓海涛 张长耀

(中国电子科技集团公司第 38 所 合肥 230031)

摘要:该文首先对国内的几种 GMTI 系统动目标处理性能进行了简单分析,接着给出了一种以杂波抑制干涉(CSI)算法为基础的机载三通道 GMTI 信号处理方法及处理流程。然后根据几何关系分析了杂波抑制原理,并结合实际飞行情况给出一种基于最小功率准则的通道补偿相位自适应对消方法。最后分析了动目标干涉相位定位和测速相关问题,实际试验结果表明该方法有效。

关键词:三通道动目标定位;杂波抑制;最小功率准则;动目标检测

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0370-04

A Real-Time Signal Processing Method for Air-born Three-channels GMTI

Deng Hai-tao Zhang Chang-yao

(CETC 38th Institute, Hefei 230031, China)

Abstract: In this paper, the performance of several China GMTI systems is briefly introduced at first. After that, a method is prompted based on CSI algorithm for air-born three-channels GMTI signal processing. The processing diagram of this method is given, the principle of clutter suppress is analyzed, an adaptive phase compensation method for each channel is presented based on the minimum power criterion and the locating and velocity-estimation problem of moving targets is analyzed. The actual experiment result show that the presented method is efficient.

Key words: Three-channels moving target located; Clutter suppression; Minimum power rule; Moving target detected

1 引言

对合成孔径雷达的一个十分重要的需求是具有地面动目标的检测能力。目前国内具有 GMTI 功能的机载 SAR/GMTI 系统主要有 3 种形式,最简单的是单天线收发的 SAR/GMTI 系统,该系统通过天线机械扫描,进行动目标搜索,其优点是设备量及信号处理运算量小,其缺点是低速动目标检测能力差且定位精度低;其次是单发双收系统,该系统采用全天线孔径发射,两个子天线孔径接收,采用电子扫描进行动目标搜索,其设备量大一些,优点是可以进行通道杂波抑制,较单通道系统而言具有更低的 MDV。由于只有两个通道,因此只能直接通过两通道干涉获取动目标干涉相位,受杂波影响,定位精度也不高^[1]。最后一种系统是单发 3 收系统,接收时将全天线孔径等分为 3 个子天线孔径,其缺点是设备量和信号处理量大,优点是不仅最小可检测速度低,且由于有 3 个通道,可以先两两通道进行杂波对消,得到两个对消通道后再进行动目标干涉,杂波得到有效抑制,动目标定位精度高^[2]。

具有 3 个以上接收通道的 SAR/GMTI 系统具有更多的自由度^[3],可采用 STAP 处理^[4],其动目标处理性能更高,

由于设备量大,目前国内尚无采用。本文主要针对三通道 GMTI 系统,给出一种便于实时实现的信号处理方法及过程。

2 系统三天线工作示意图

3 通道 GMTI 天线收发工作示意图如图 1 所示。全天线孔径发射,接收时天线孔径等分成 3 个子天线孔径,且发射时天线波束展宽,保证收发天线照射区域一致。这里定义沿飞行方向最前端的通道为 A 通道。

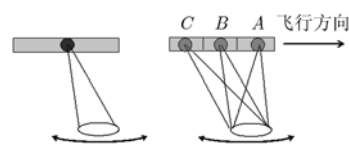


图 1 天线收发工作示意图

3 GMTI 信号处理算法

本文 3 通道 GMTI 信号处理流程如图 2 所示。

处理算法主要基于杂波抑制干涉(CSI)算法,CSI 技术首先形成多通道子图像,此时不同方位角的地面静止目标将分布在不同的多普勒滤波器组内,然后对不同的多普勒滤波器组内的目标分别进行通道间相位差补偿后对消。该处理方

法杂波抑制能力强,运算量小,且不受 DPCA 条件限制,非常适合机载 GMTI 实时处理^[5]。

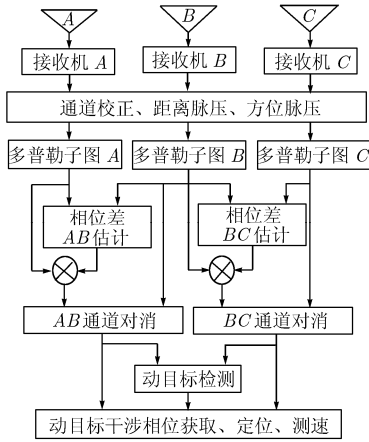


图 2 处理流程框图

3.1 通道均衡技术

通道均衡是多通道 GMTI 处理中必不可少的一环,补偿通道之间的不一致性,可提高通道信号之间的相关性,利于通道对消。通道均衡具体操作过程是先采集 3 个通道的测试信号,并对测试信号进行傅里叶变换,然后获得各通道测试信号的幅频和相频特性,并以其中一个通道作为参考基准,获得其它两个通道的幅相误差,进行幅相补偿。

3.2 通道子图像形成

3 个通道信号经过通道校正后,采用传统的 RD 算法,进行走动校正、距离脉压后,以中间通道(B 通道)为基准,补偿 A、C 通道因接收天线相位中心位置偏差带来的多普勒偏移,对 A、C 通道的多普勒偏移补偿量分别为 $-v_a d/(\lambda R)$ 、 $v_a d/(\lambda R)$,其中 v_a 为平台速度、 d 为相位中心间距、 λ 为波长、 R 为斜距。经过多普勒偏移补偿后,方位向采用去调频压缩,得到 3 个通道多普勒子图像^[6]。

3.3 通道对消

获得三通道的多普勒子图像后,接下来就是进行子图像中静止目标的对消。由于 3 个通道天线接收相位中心位置不一致,因此通道对消时需要进行通道间相位差的补偿。下面分析该相位差。

图 3 表示某静止目标 P 到 3 通道相位中心示意图,其方位角为 α ,根据几何关系计算可得

$$AP - BP \approx -d \sin \alpha + \frac{d^2}{2R_c} \cos^2 \alpha \quad (1)$$

$$BP - CP \approx -d \sin \alpha - \frac{d^2}{2R_c} \cos^2 \alpha \quad (2)$$

A、B 通道对消时,A 通道方位角为 α 的静止目标所在多普勒单元补偿相位为

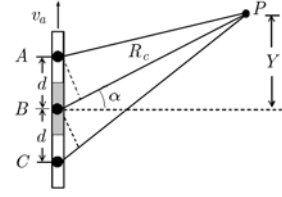


图 3 3 通道空间示意图

$$\Delta\phi_{AB} = -2\pi \frac{d \sin \alpha}{\lambda} + \pi \frac{d^2}{\lambda R_c} \cos^2 \alpha \quad (3)$$

B、C 通道对消时,B 通道方位角为 α 的静止目标所在多普勒单元补偿相位为

$$\Delta\phi_{BC} = -2\pi \frac{d \sin \alpha}{\lambda} - \pi \frac{d^2}{\lambda R_c} \cos^2 \alpha \quad (4)$$

根据方位去调频脉压原理,设多普勒子图像第 n 个单元对应的多普勒频率为 $f_a(n)$,对应静止目标方位角为 $\alpha(n)$,则 $f_a(n)$ 与 $\alpha(n)$ 关系为

$$\sin \alpha(n) = \frac{f_a(n)\lambda}{2v_a} \quad (5)$$

将式(3),式(4)中 α 推广到子图像任意多普勒单元所对应方位角的 $\alpha(n)$,并联合式(5)可得 A、B 通道对消及 B、C 通道对消时 A 通道子图像和 B 通道子图像中各多普勒单元的补偿相位分别为

$$\Delta\phi_{AB}(n) = -2\pi \frac{d}{v_a} f_a(n) + \pi \frac{d^2}{\lambda R_c} \left(1 - \frac{f_a^2(n)\lambda^2}{4v_a^2}\right) \quad (6)$$

$$\Delta\phi_{BC}(n) = -2\pi \frac{d}{v_a} f_a(n) - \pi \frac{d^2}{\lambda R_c} \left(1 - \frac{f_a^2(n)\lambda^2}{4v_a^2}\right) \quad (7)$$

由于 $d \ll R_c$,且 $f_a(n)$ 的变化范围为 $-\text{PRF}/2 + F_{\text{DC}} < f_a(n) < \text{PRF}/2 + F_{\text{DC}}$, F_{DC} 为多普勒子图像中心频率,因此可将上两式中第 2 项近似为一个常数项,即

$$\pi \frac{d^2}{\lambda R_c} \left(1 - \frac{f_a^2(n)\lambda^2}{4v_a^2}\right) \approx \pi \frac{d^2}{\lambda R_c} \left(1 - \frac{F_{\text{DC}}^2 \lambda^2}{4v_a^2}\right)$$

则式(6),式(7)可写成

$$\Delta\phi_{AB}(n) = -2\pi \frac{d}{v_a} f_a(n) + \pi \frac{d^2}{\lambda R_c} \left(1 - \frac{F_{\text{DC}}^2 \lambda^2}{4v_a^2}\right) \quad (8)$$

$$\Delta\phi_{BC}(n) = -2\pi \frac{d}{v_a} f_a(n) - \pi \frac{d^2}{\lambda R_c} \left(1 - \frac{F_{\text{DC}}^2 \lambda^2}{4v_a^2}\right) \quad (9)$$

理想情况下,通道间两两对消时只需采用式(8),式(9)进行补偿对消即可。实际情况下,由于平台飞行速度的变化,以及运动误差的存在,所以直接进行补偿对消,效果较差。式(8),式(9)是由 $f_a(n)$ 的线性项和常数项构成。在实际信号处理中需通过 3 通道子图像复数据自估计的方法进行上两式中线性项系数和常数项的提取。下面给出实际数据处理时的提取过程。

(1)从 A、B 通道复图像中分别取出第 n 个多普勒单元中

所有距离波门的复数据。根据最小功率准则,可得第 n 个多普勒单元 A 通道的补偿矢量为

$$W_A(n) = \frac{\sum_{m=1}^M A^*(m)B(m)}{\sum_{m=1}^M |B(m)|^2} \quad (10)$$

其中 $A(m)$, $B(m)$ 分别代表 A , B 两通道复图像。 $m=1 \sim M$, M 为图像距离单元数据。

(2)完成所有多普勒单元($n=1 \sim N$, N 为多普勒单元数, 试验中 $N=32$)的补偿矢量估计后, 求出 $W_A(n)$ 相位值, 对 $W_A(n)$ 相位值解缠绕后进行线性拟合, 即得出式(8)中线性项和常数项。

(3)采用同样步骤, 可以获得式(9)中线性项和常数项。

根据得到的线性项和常数项可构造补偿函数, 进行两两通道补偿并对消后可得两幅对消后的残差子图像。

3.3 动目标相对定位与测速

进行通道对消后, 杂波得到有效抑制, 需进行动目标的检测^[7], 动目标的检测方法较多, 这里就不作讨论。检测出动目标后, 将同一动目标在两幅残差子图像中的相位求出并相减^[8], 即获得动目标干涉相位 $\Delta\varphi$ ^[9]。根据动目标定位原理:

$$Y = \frac{\lambda R_c \Delta\varphi - \pi d^2}{2\pi d} \quad (11)$$

其中 R_c 为动目标到雷达的斜距。式(11)的推导过程须从 3 通道接收的回波信号模型开始, 篇幅过大, 文献[10]中也有推导, 因此这里推导过程省略。

这里需要指出的是动目标干涉相位 $\Delta\varphi$ 存在 2π 周期性模糊。因此根据式(11)算出的动目标方位位置 Y 也存在模糊。因此, 式(11)应该写为

$$Y = \frac{\lambda R_c (\Delta\varphi + z \cdot 2\pi) - \pi d^2}{2\pi d} \quad (12)$$

其中 z 为模糊周期数。

对应的方位定位模糊周期为 $\lambda R_c / d$ m, 若转换成方位角度, 即模糊周期为天线波束宽度 λ / d 。关于动目标方位位置 Y 解模糊方法将在下面结合飞行试验处理过程进行分析。

4 飞行试验

4.1 试验系统参数

本次试验采用运 7 平台, 雷达采用 X 波段, 波长 0.03m, 全天线长 1.5m, 全孔径天线发射且波束展宽 3 倍, 接收时每个子孔径天线 0.5m, 则收发合成波束 3dB 宽度约 3.44° 。波束扫描范围正负 36° , 步阶 0.6° , 具体系统参数如表 1 所示。

4.2 三通道子图像成像和通道对消结果

图 4 为本次试验飞行数据获得的三通道子图像结果。两两通道对消结果如图 5 所示。

表 1 系统参数

发射带宽: 20MHz	发射时宽: $15\mu\text{s}$
PRF: 1000Hz	通道数: 3
一个 CPI: 32 个脉冲	平台速度: 110m/s
一个扫描帧: 121 个 CPI	
雷达波束指向测量精度优于 0.2°	

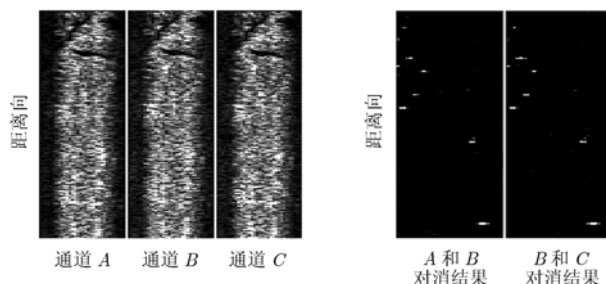


图 4 3 通道低分辨多普勒子图结果

图 5 A 和 B, B 和 C 通道对消结果

4.3 动目标方位定位解模糊过程及结果

波束宽度为 3.44° , 每个 CPI 波束跳扫 0.6° , 因此同一动目标会连续出现在约 5 个 CPI 内, 根据发现该动目标的起始和结束 CPI 号所对应的波束指向角(考虑偏航因素)来粗略估算该动目标方位角。根据目标斜距算出动目标的大致方位位置:

$$Y_{\text{ref}} = R_c \sin\left(\frac{\varphi_{\text{star}} + \varphi_{\text{end}}}{2}\right) \quad (13)$$

其中 φ_{star} , φ_{end} 分别为动目标出现的起始和结束 CPI 号所对应的波束中心指向角。需要说明的是相邻 5 个 CPI 时间不到 0.2s, 平台运动不到 30m, 而作用距离几十公里, 平台相对目标运动的转角可以忽略不计。

此时只需取一个适当的整数 z 能使 $|Y - Y_{\text{ref}}|$ 最小, 将此时 z 值代入式(12)就可进行方位定位 Y 解模糊。

图 6 表示一斜距 R_c 为 32.54km 的动目标连续出现在 5 个 CPI(从第 7~11 CPI)的结果。

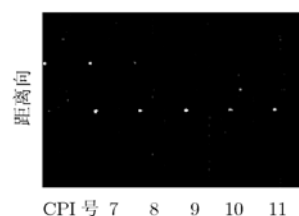


图 6 动目标连续 5 个 CPI 的结果

根据各 CPI 波束指向角, 由式(13)得目标定位参考 $Y_{\text{ref}}=16560\text{m}$, 模糊周期 $\lambda R_c / d=1952.4\text{m}$ 。

表 2 是该动目标定位解模糊的结果(以第 9 个 CPI 中心时刻平台的位置, 沿航迹方向和航迹垂线方向建立坐标系)。

表 2 动目标方位定位解模糊结果

CPI 号	波束中心 指向角(°)	Y (m) (解模糊前)	z 模糊周期	Y (m) (解模糊后)
7	31.8	-778.3	9	16793.3
8	31.2	1156.4	8	16775.6
9	30.6	1161.0	8	16780.2
10	30.0	-817.5	9	16754.1
11	29.4	1148.6	8	16767.8

从第 7~11 CPI 的方位定位解模糊后结果来看, 动目标在各 CPI 内的定位结果基本一致(各 CPI 干涉相位受信噪比影响不同, 干涉结果也存在差异)。将各 CPI 的定位结果进行平均处理, 可得到更高的方位定位精度。

4.4 动目标径向测速

知道动目标真实方位后, 可计算出动目标因平台运动产生的多普勒值, 将该多普勒值与动目标所在图像多普勒单元对应的多普勒值(虚假多普勒)相减, 此多普勒差值即为动目标径向运动速度 v_r 引起的。因此可得动目标径向速度为

$$v_r = f_m \lambda / 2 - v_a Y / R_c \quad (14)$$

其中 v_a 为平台速度, f_m 为动目标所在图像多普勒单元对应的多普勒值。

系统 PRF 不高, 式(14)中 f_m 易发生周期模糊, 此时动目标径向速度也是模糊的, 解决方案可以通过扫描帧间相关后, 根据动目标在扫描帧间隔时间内的位移直接进行动目标径向速度来解模糊。

关于动目标的帧间相关及动目标相对定位转换为经纬度定位, 本文限于篇幅不予讨论。

5 结束语

本文基于 CSI 算法原理, 结合机载 3 通道 SAR/GMTI 实际试验, 给出一种 3 通道 GMTI 实时信号处理过程, 重点分析基于回波估计的杂波对消方法和动目标方位定位。该方法在机载试飞试验中得到成功应用, 检测出大批动目标, 并能精确的进行动目标定位。证明该方法可行。

参 考 文 献

[1] Gierull C H and Livingstone C. SAR-GMTI concept for RADARSAT-2. The applications of space-time adaptive processing. R. Klemm, Ed, IEE Press, Stevenage, UK, 2004.
[2] 武昕伟, 张宏荣, 张长耀, 等. 基于双路 ADPCA 技术的动目标定位分析[C]. CSAR, 南京, 2005, 11 月 2-5 日: 405-409.

Wu Xin-wei Zhang Hong-rong, and Zhang Chang-yao. Location analysis of moving target based on double channel ADPCA[C]. CSAR, Nanjing, Nov. 2-5, 2005: 405-409.
[3] Paine A S. Application of the minimum variance monopulse technique to space-time adaptive processing. IEEE RADAR2000, Alexandria VA, May 8-12, 2000: 596-601.
[4] Wang Yongliang and Peng Yingning. Space-Time Adaptive Processing. Tsinghua University Press, 2000: 46-55.
[5] 廖剑峰. 合成孔径雷达动目标检测与成像方法的研究[D]. [硕士学位论文], 合肥工业大学, 2003.
Mu Jian-fen. Research on synthetic aperture radar moving targets detection and imaging[D]. [master's dissertation]. Hefei University of Technology, 2003.
[6] Xi Longmei and Zhang Changyao. A kind of dual-channel GMTI real-time processing method based on frequency DPCA[C]. Proceedings of 2006 cie international conference on radar, Shanghai, Chian, Oct. 16-19, 2006: 1809-1812.
[7] 薛威. 基于 DPCA 的机载雷达主杂波自适应抑制技术研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2001.
Xue Wei. On airborne radar main lobe clutter adaptive suppression techniques based on DPCA. [Ph. D dissertation]. University of electronic science and technology of China, 2001.
[8] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测与成像研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院研究生院, 2003.
Zheng Ming-jie. Research on synthetic aperture radar moving targets detection and imaging[D]. [Ph. D dissertation]. Graduate school of Chinese academy of sciences, 2003.
[9] 张英, 李景文, 等. 基于 DPCA 的机载 SAR 动目标检测与定位方法研究[C]. CSAR, 合肥, 2003, 12 月 1-4 日: 221-225.
Zhang Ying and Li Jing-wen *et al.* on airborne SAR moving target detection and location method based on DPCA technique[C]. CSAR, Hefei, Dec. 1-4, 2003: 221-225.
[10] 李景文. 合成孔径雷达动目标检测与成像[D]. [博士学位论文], 北京航空航天大学, 1999.
Li Jing-wen. Research on synthetic aperture radar moving targets detection and imaging[D]. [Ph. D dissertation]. Graduate school of Beijing university of aeronautics and astronautics, 1999.

邓海涛: 男, 1978 年生, 工程师, 从事 SAR/GMTI 信号处理。
张长耀: 男, 1942 年生, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理。