

# 机载雷达单脉冲前视成像算法

吴迪 朱岱寅 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京 210016)

**摘要** 单脉冲技术通过比较单个脉冲多路回波信号的信息实现对目标角度位置的精确测量, 广泛运用于跟踪雷达中。将其运用于成像中可以实现合成孔径雷达 (SAR), 多普勒波束锐化 (DBS) 等技术难以实现的前视成像, 针对这一点, 提出了一种单脉冲前视成像算法。实测数据处理结果表明, 这种方法与实波束成像相比, 可以显著改善图像质量, 具有很高的实用价值。

**关键词** 单脉冲 前视成像 和差波束 测角

中图分类号: TN958.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)03-462-07

## Research on Monopulse Forward-looking Imaging Algorithm for Airborne Radar

WU Di, ZHU Daiyin, ZHU Zhaoda

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** Monopulse is a technique with which information concerning the angular location of a target is obtained by comparison of signals received in multichannels. It is widely used in tracking radars. This paper proposes a valuable monopulse imaging algorithm for airborne radar forward-looking imaging. As is proved by experimental results compared to the real beam imaging method, this algorithm can provide remarkably improved images which are difficult to be obtained by SAR or DBS.

**Keywords** monopulse forward-looking imaging sum-difference beams angle estimation

## 0 引言

机载雷达对地面成像的过程中, 常常利用雷达平台相对地面目标的方位向运动引起的多普勒频率变化提高方位向分辨率, 如合成孔径雷达 (SAR)、多普勒波束锐化 (DBS) 技术等。但当天线波束处于前视状态时, 成像区地面目标回波多普勒频率梯度几乎为零, 方位分辨率急速下降, 形成 SAR 或 DBS 成像的盲区。在这种情况下, 地面成像常常采用实波束成像, 由信号处理机对接收到的回波信号进行视频积累后, 再作坐标变换, 继而得到天线波束扫过区域的地面图像<sup>[1]</sup>, 但这种方法受到天线波束宽度的

限制, 难以得到方位向较高的分辨率。

单脉冲技术通过比较一次脉冲回波的和、差信号信息对目标的角度进行测量<sup>[2-6]</sup>, 其测角精度高, 广泛地应用于雷达跟踪技术中, 并能够与逆合成孔径雷达 (ISAR) 技术结合, 实现对飞机、舰船等目标的 3 维成像。由于单脉冲技术对波束内散射点的精确定位性能, 将其引入机载雷达对地面成像处理的过程中可以显著提高图像的质量, 使得某些具有特征的目标更为清晰, 位置更加精确。并且由于此技术对地面散射点的多普勒频率没有要求, 从而可用于改善前视成像的质量。事实上, 美国的 C-130 战术运输机的早期雷达 APN-241 就具备单脉冲前视成像功能, 其成像效果比实波束提高 2.5 到 10

基金项目: 航空科学基金项目 (20080152004); 教育部博士点基金项目 (20070287053)

收稿日期: 2009-03-11; 改回日期: 2009-07-27

第一作者简介: 吴迪 (1982—), 男, 南京航空航天大学在读博士研究生。主要研究方向为雷达信号处理。E-mail: wudi\_nuaa@yahoo.cn

倍<sup>[4]</sup>, 然而由于种种原因, 其技术并没有在公开文献中发表, 文献 [4] 中仅仅提供了一幅其对某机场的单脉冲前视成像图。在国内, 对将单脉冲技术引入前视成像处理中的研究也比较少, 近期, 李悦丽等提出了一种单脉冲雷达多通道解卷积的前视成像算法, 将成像效果提高了约一个数量级<sup>[7]</sup>, 然而这种算法在信号处理中需要引入大量的解卷积运算, 处理过程比较复杂, 因此难以实时实现。

本文根据单脉冲技术的测角原理, 提出了一种机载雷达的单脉冲前视成像算法, 此方法能够实现 SAR, DBS 技术难以实现的前视成像, 与实波束成像相比, 这种算法能够显著提高图像质量。通过大量仿真实验验证了此算法的有效性, 并讨论了其在不同条件下的成像效果。最后对某型机载雷达和、差波束单脉冲前视数据进行了成像处理, 结果表明, 此技术在提高成像质量的同时, 在信号处理过程中并不涉及复杂的运算, 对计算量的要求不高, 十分有利于工程实现, 具有很高的实用价值。

### 1 单脉冲基本原理简介

单脉冲技术利用相互交叠的天线波束多路接收信号, 只需一个脉冲回波, 就可以给出目标方位位置的全部信息<sup>[2-4]</sup>。由于测量精度高, 单脉冲技术广泛地应用于对目标的搜索与跟踪中, 并且可以与 SAR 技术结合, 用于地面动目标指示 (GMTI) 技术中<sup>[8]</sup>。

根据从回波信号中提取目标角度信息方式的特点, 单脉冲可分为比幅单脉冲与比相单脉冲<sup>[2-6]</sup>。在实际运用中, 根据测角方法的不同, 又可以将其实现方式分为 9 种<sup>[5]</sup>。本文采用了综合和、差单脉冲的方法实现对回波方位角的测量。

如图 1 所示, 天线由孔径中心  $O$  发射信号, 分别由间隔为  $d$  的  $A, B$  子孔径接收信号, 再分别将  $A, B$  接收到的信号相加相减得到和、差两路信号。这种接收方式等效于天线分别使用和、差波束接收信号, 其等效天线方向图如图 2 所示。

设  $\Sigma(\theta)$  和  $\Delta(\theta)$  分别为雷达的和、差波束天线方向图, 其中  $\theta$  表示相对于波束中心线方向的方位角, 它们的幅相关系为<sup>[2]</sup>

$$\Delta(\theta) = j\Sigma(\theta) \tan\left[\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta)\right] \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为雷达波长。设某一个距离单元内存在与波束中心线夹角为  $\theta_0$  的点目标, 其和、差波束的回

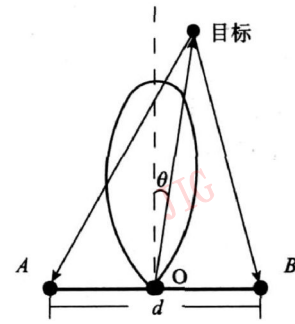


图 1 天线收发信号示意图  
Geometry of antenna transmitting and receiving

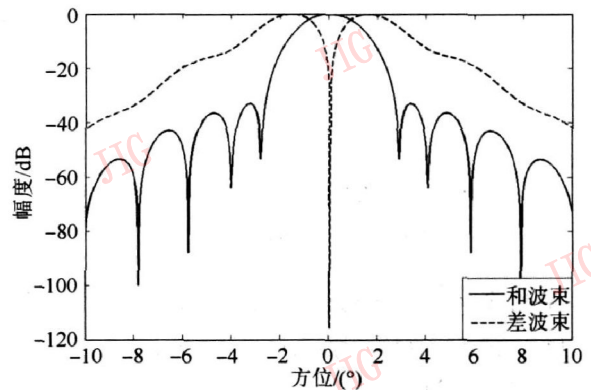


图 2 和、差波束天线方向图  
Fig. 2 Patterns of sum-difference beams

波的一次快拍可分别表示为

$$S_{\Sigma}(t_k) = S(t_k) \Sigma(\theta_0) \quad (2)$$

$$S_{\Delta}(t_k) = S(t_k) \Delta(\theta_0)$$

其中  $t_k$  为采样后的脉间时间变量,  $S(t_k)$  表示未经过天线方向图加权的单个脉冲回波信号, 因此可以根据差信号与和信号的比值构造定向特性关系式:

$$K(\theta_0) = \frac{S_{\Delta}(t_k)}{S_{\Sigma}(t_k)} = j \tan\left[\frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta_0)\right] \quad (3)$$

由于在主瓣范围内  $\theta_0$  的变化范围很小,  $\sin(\theta_0) \approx \theta_0$  的近似关系成立, 因此

$$K(\theta_0) \approx j \tan\left[\frac{\pi d}{\lambda} \theta_0\right] \quad (4)$$

再根据对  $K(\theta_0)$  幅度和相位的检测便可以完成对目标方位角  $\theta_0$  的测量。

### 2 单脉冲成像技术

单脉冲技术可以测得目标在实波束中的精确位置, 因此, 将其用于机载雷达对地面的成像处理中可以显著改善图像质量。即运用这种技术, 不仅能够显著提高实波束成像图中很多特征目标的

清晰度,而且能够提高其方位位置的精确度。特别是当某一距离单元内波束方位范围中只存在一个反射能量较强的目标,或存在一些连续的反射能量较弱的区域时,这种改善效果尤为显著。且这种改善不依赖于目标的多普勒频率,可以实现 SAR, DBS 等技术难以实现的前视图像效果的改善。由于这种成像方法中使用了单脉冲技术,故称之为单脉冲成像技术。

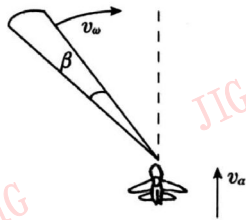


图 3 前视成像几何关系示意图

Fig. 3 Forward-looking imaging geometry

如图 3 所示, 载机以速度  $v_a$  飞行的过程中, 主瓣宽度为  $\beta$  的天线波束以固定的角速度  $v_\omega$  在前方较小的方位内进行扫描, 并以固定的脉冲重复频率发射脉冲信号, 通过两路接收形成和、差信号。在单脉冲成像技术中, 距离向分辨率的提高与其他成像方法相似, 即利用脉冲压缩技术来实现。因此, 在成像处理中, 首先需要将对、差两路回波信号的距离向作脉冲压缩处理, 然后利用单脉冲技术的精确定位性能提高目标的方位向图像精度, 具体算法流程如图 4 所示。

设距离向脉冲压缩后和、差通道第  $k$  个存储单元的回波信号分别为  $S_\Sigma(n, m)$ ,  $S_\Delta(n, m)$ , 其中  $n, m$  表示存储单元对应的距离门和脉冲序号。为了提高图像方位精度, 需要利用单脉冲技术将每一个存储单元的回波信号在方位向进行重新精确定位, 首先在数据域将每一个回波存储单元的方位范围  $N$  等分, 这一过程相当于将方位分辨单元减小为原来

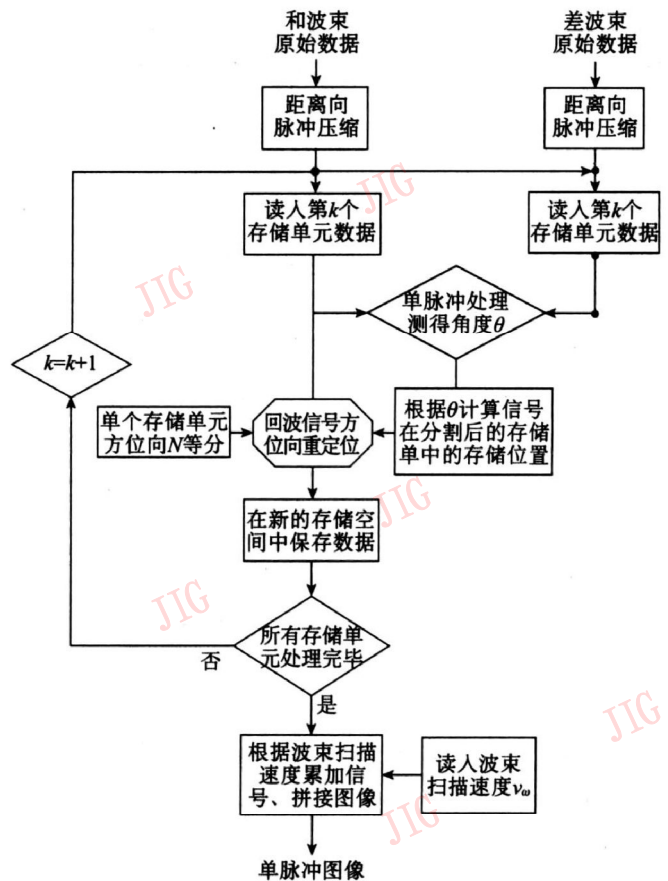


图 4 单脉冲成像算法流程图

Fig. 4 Monopulse imaging flow diagram

的  $1/N$ , 如图 5 (a) (b) 所示, 其中阴影部分表示信号存在的单元。

其次, 对每一个存储单元的和、差信号进行单脉冲处理, 即构造定向特性关系式

$$K(\theta) = \frac{S_\Delta(n, m)}{S_\Sigma(n, m)} \quad (5)$$

再根据式 (4) 得出每个存储单元回波所对应的地面目标在实波束中的方位角  $\theta$  根据所得方位角的值将信号重新定位于分割后的方位单元  $m_k$  内, 如图 5 (c) 所示, 从而将每一个回波存储单元的信号在方位向重新精确定位。

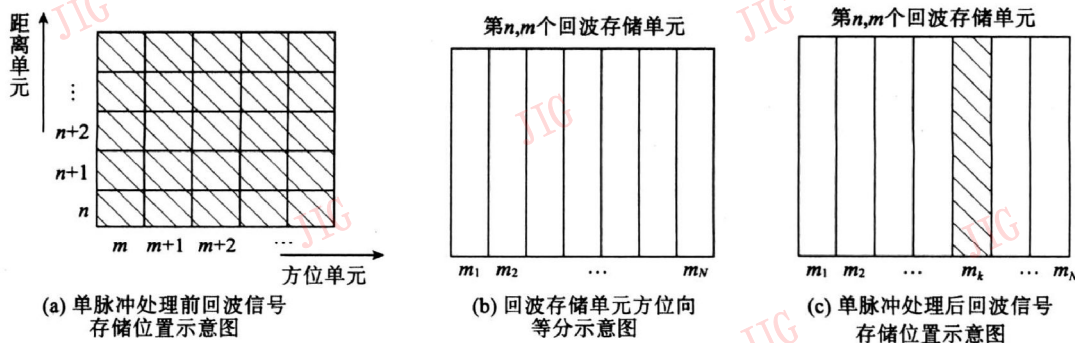


图 5 单脉冲处理中数据存储位置示意图

Fig. 5 Data locations for monopulse processing

将每个像素单元的回波信号按照上述方案处理完毕后,再根据波束扫描速度将经过单脉冲处理后的信号进行累加、拼接,完成对整个扫描区域的成像。

从上述可以看出,本文提出的成像算法并没有涉及如解卷积、傅里叶变换等复杂的信号处理运算。因此,在实际处理时,对运算量的要求不高,从而有利于实时实现。

对地面散射点精确定位的性能,使得单脉冲成像技术能够得到比实波束图像更清晰的地貌特征。这一特点可以通过对成像区中理想点目标的成像仿真说明,表 1 给出了本次仿真实验的主要系统参数,本文所涉及的所有仿真实验均采用这组系统参数。

表 1 仿真实验参数列表

Tab. 1 Parameters for the simulation

参数名称	参数值
和波束主瓣宽度	1°
天线波束方位角扫描速度	35°/s
成像区中心点距离	4 000 m
脉冲重复频率 (PRF)	2 000 Hz
载机飞行速度	100 m/s
天线波束方位向扫描范围	- 10°~ 10°

这里假设同一距离门中波束方位向范围内只存在一个点目标,如图 6所示,对于成像区中的“X”字型的 9 个点目标,首先,用实波束方法对其成像,由于实波束成像过程中,方位向的分辨完全靠波束自身的宽度实现,因此,每个点目标在图像方位向均占据了若干单元,使得图像难以反映其精确的方位位置。单脉冲成像可以明显改善这一点,将方位像素单元压缩 10 倍 ( $N = 10$  本文其他实验均采用此参数),经过单脉冲处理后的图像将实波束图像中方位向的“线”压缩成了“点”,并且点的位置精确地反映了目标的真实位置。图 6 中的 (c)、(d) 两图为中心点目标的方位向剖面图,从这两幅图中可以清楚地看到,单脉冲成像图中目标的方位波形变窄,位置更加精确。

然而,实际成像过程中,回波信号是地面无穷多个连续点目标的回波矢量和。在单脉冲处理时,和、差波束回波的比较是对许多点目标回波信号矢量叠加的比较,在这种情况下,单脉冲成像技术对图像质量的改善程度是我们比较关心的问题,下面一节,我们将从几种不同的地貌特征入手,讨论了在不同情况下单脉冲成像技术对成像效果的改善程度。

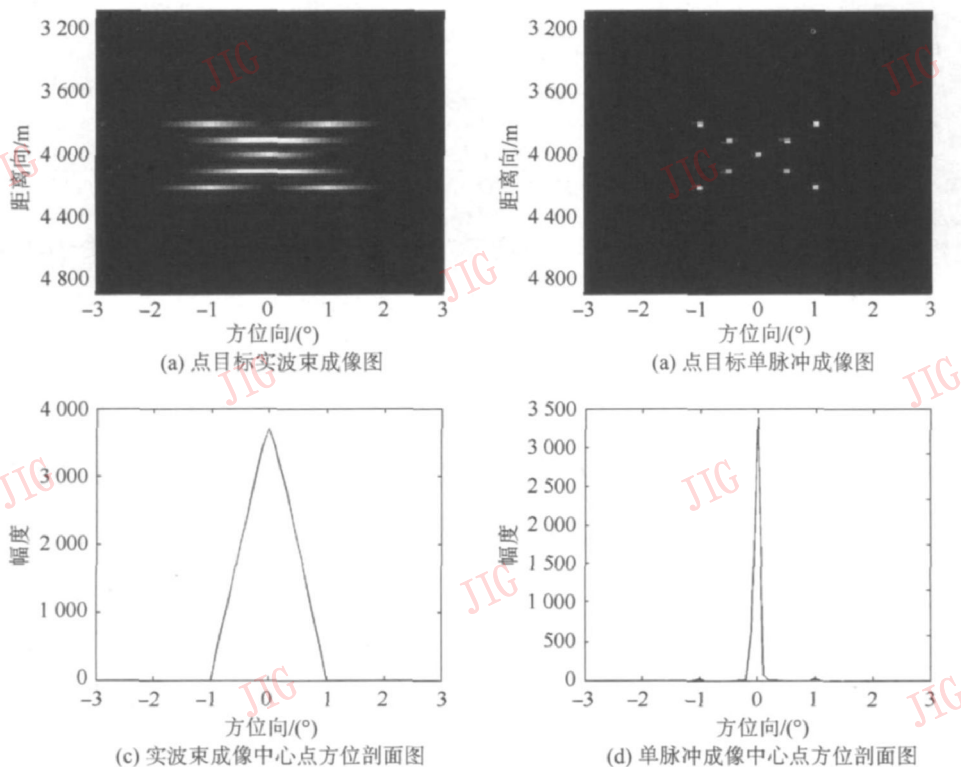


图 6 点目标成像仿真结果

Fig. 6 Simulations of point target imaging

### 3 单脉冲成像效果讨论

单脉冲技术最初是对波束中的单个目标角度位置进行精确测量的技术,因此当波束中同时出现多个目标时,测角性能就会急剧下降以致无法检测目标的准确位置,这时利用式(4)测得的角度 $\theta$ 并不能反映单个目标的真实方位角,甚至 $\theta$ 还会有一定的概率偏离出实际的方位波束范围<sup>[9]</sup>。利用单脉冲技术成像时,上述问题是不可避免的,因此,从这一点上看,单脉冲技术并不是一种能够在整个图像范围内提高方位向分辨率的方法。它对图像质量的改善主要体现在对具有特征的地貌图像清晰度的改善上,而这种改善在实际运用中却具有重要的价值。因为,在很多时候,我们感兴趣的并不是整个雷达图像,而是其中有某些特征的区域、建筑或物体等。例如,在作战时对前方地面车辆的成像;又如,在载机实现盲着陆时对前方跑道的成像等。在这些实际要求中,单脉冲成像技术能够大大改善成像质量,使我

们能够获得实际应用中感兴趣的区域、物体更清晰的图像。为说明这一点,首先利用仿真数据(仿真参数均为表1所示),对几种具有特征的地貌进行了单脉冲成像处理,结合成像实验结果,具体讨论如下:

#### 1) 强反射点地貌

这种地貌的特点是,在单个距离单元中,方位向波束主瓣范围内只存在一个强反射点。在实际中,金属目标如车辆,武器库等均符合这种地貌特征。如图7所示,在单个距离单元内,地面反射系数服从复高斯分布,其中在 $0^\circ$ 的方位位置存在一个强反射点,其反射能量相对其他目标约为20 dB。在这种情况下,单脉冲技术每个脉冲测得的角度 $\theta$ 都近似于强反射点的真实角度,并且近似程度随着强反射点能量的增加而增加。因此,每次测角后再根据波束扫描速度将每个脉冲累积便得到了单脉冲成像方位向剖面图如图7(c)所示,可以看出它与实波束成像方位剖面图7(b)相比,图像的清晰度和位置的精确度得到了明显提高。

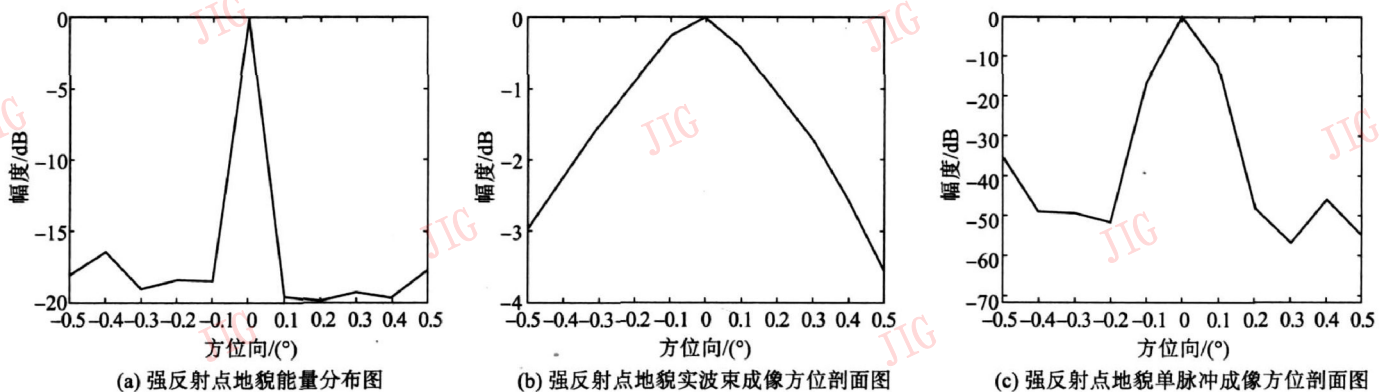


图 7 强反射点地貌成像结果

Fig. 7 Imaging results of strong target

#### 2) 弱反射点地貌

这种地貌特征与强反射点地貌相反,在同一距离单元内,方位向波束主瓣内有一些连续的反射点能量很弱。在实际中,高速公路、机场跑道等均符合这种地貌特征。如图8所示,在反射系数服从复高斯分布的地面中存在一些弱反射点,其相对能量约为-20 dB,位于 $-0.1^\circ \sim 0^\circ$ 位置。在这种情况下,每个脉冲测得的角度 $\theta$ 都偏离弱反射点的真实角度,并且偏离程度随着弱反射点能量的减少而增加,因此,按照波束扫描速度积累后,弱反射点所在的像素单元能量积累很少,从图像上可明

显区别于其他点,如图8(c)所示,这种地貌下,单脉冲成像技术所得的图像效果也明显优于实波束成像图(图8(b))。

#### 3) 其他地貌

除了上述的两种地貌特征外,在其他不存在明显强、弱反射点的地貌特征下,波束中每个反射点处在不同的角度,它们各自的回波到达天线的方位角 $\theta$ 是不同的,这些不同的回波波前在孔径上进行矢量叠加,形成一个幅度和相位不均匀的合成波前,使得测角过程无法完成<sup>[3]</sup>。因此,在这种情况下,单脉冲成像技术对成像质量的改善效果并不明显。

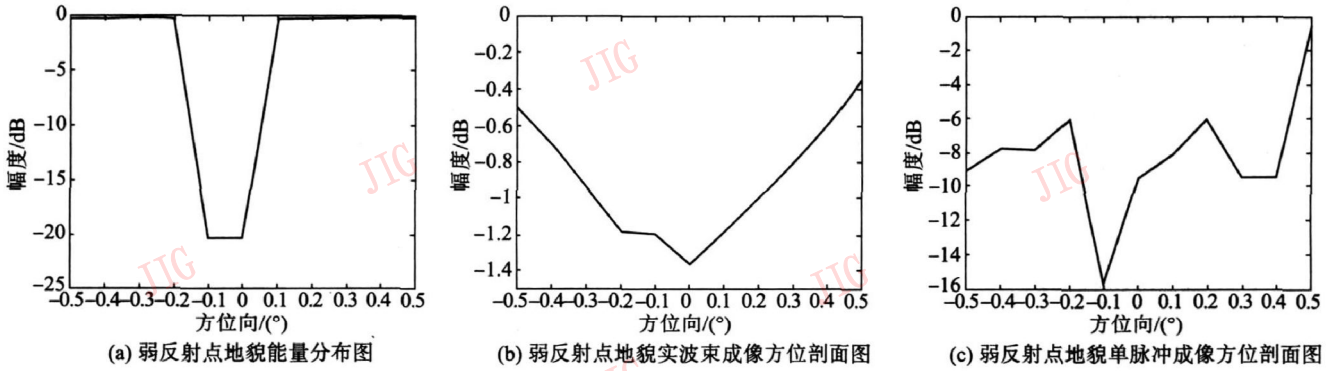


图 8 弱反射点地貌成像结果

Fig. 8 Imaging results of weak target

综上所述,单脉冲成像对图像效果的改善是一种非均匀的改善。在实际应用中,对前两种地貌成像效果的改善,使得单脉冲成像技术具有很高的使用价值,利用它,可以提高雷达前方目标的检测效率和定位精度。同时,在载机于不良着陆点实现盲着陆的过程中,它可以提供更清晰的实时前方地面图像,从而给着陆提供了更高的安全保障。

通过上面分析同样可以看出,很多因素会对单脉冲成像的效果产生影响,以第一种地貌特征为参考,对单脉冲成像性能产生影响的具体因素进行了讨论。

1) 接收机热噪声。在实际中,接收机在接收信号时不可避免地会受到噪声的影响。接收机的噪声对和、差两路信号的影响可表示为

$$\begin{aligned} S_{\Sigma}(t_k) &= S(t_k) \cdot \Sigma(\theta) + n_{\Sigma}(t_k) \\ S_{\Delta}(t_k) &= S(t_k) \cdot \Delta(\theta_0) + n_{\Delta}(t_k) \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $n_{\Sigma}(t_k)$ ,  $n_{\Delta}(t_k)$  为叠加于和、差信号的加性噪声,由于它们的存在,每次测角的精确度都会受到影响,即引入了一个随机的测角误差。这个测角误差的均方根理论值参见文献 [10],它与信噪比的平方根成反比。因此,最后经过累加的图像也必然受到它的影响。可以说,排除一些误差因素,在某种程度上,接收信噪比决定了单脉冲成像技术对图像质量的改善程度。

2) 通道间的幅相误差。实际中,通道间的误差不可避免地存在,和、差波束的幅相并不完全满足式 (1),而是引入了一个通道误差因子  $A = A e^{j\beta}$ ,其中  $A$  为幅度误差,  $e^{j\beta}$  为相位误差:

$$\Delta(\theta) = j \Sigma(\theta) \tan \left[ \frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta) \right] A e^{j\beta} \quad (7)$$

因此,由和、差信号的比值构成的定向特性关系式为

$$K'(\theta_0) \approx j \tan \left[ \frac{\pi d}{\lambda} \theta_0 \right] A e^{j\beta} \quad (8)$$

在实际操作中,可以通过设定门限的方法将相位误差  $e^{j\beta}$  略去,而幅度误差则会在每次测角中引起测量角度的误差,在成像中表现为图像与实际地貌相比有一个方位的偏离。因此,在进行单脉冲成像前,往往需要对通道间的误差进行估计与校正。这一点与所有的多孔径(天线)接收技术相似,具体的校正方法有很多,文献 [11] 中,针对各种通道误差提出了较为完整的校正方案。

3) 地面反射点的能量分布。以强反射点地貌为例,强反射点的能量大小同样对单脉冲成像效果有很大的影响,以强反射点地貌的地面反射系数分布为例,在强反射点目标能量分别为 3 dB, 10 dB, 20 dB, 30 dB 时,利用单脉冲技术对其成像,由图 9 可清晰看到,单脉冲成像效果随着点目标能量的增加而逐步优化。

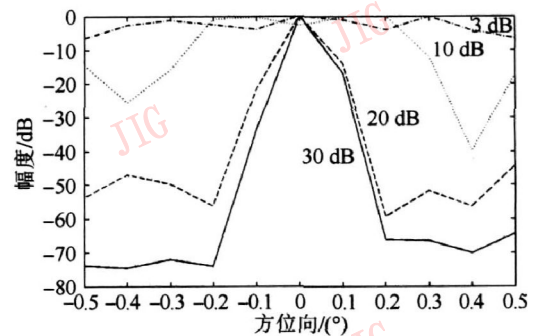


图 9 目标强度不同时单脉冲成像图

Fig. 9 Imaging results of target with different power using monopulse

4) 除了上述 3 个因素外,测角中的角闪烁等随机因素同样会对成像效果造成影响,关于角闪烁现象,文献 [2-3]均有中有详细的介绍。

为了直观地说明单脉冲技术对图像整体效果的改善,选取了有代表性的一幅高分辨率 SAR 图像作为模拟的地面场景,如图 10( a)所示,利用单脉冲成像技术与实波束成像技术分别对其作成像处理,实验中,系统参数仍为表 1 所示。

图 10 给出了成像实验的结果图,从图 10( b)、

( c)两图的对比可以看出,单脉冲成像技术对地面目标的成像效果明显优于实波束成像方法,其对图像中某些区域方位向清晰度的改善是显著的。在图 10 的 3 幅图中,注意做标志的区域,比较图 10( b)与 ( c)图中的这些区域并与图 10( a)中相应的区域对比可以发现,单脉冲成像方法可以得到从实波束图像中难以得到的地貌信息,且图像中目标的位置更加精确。

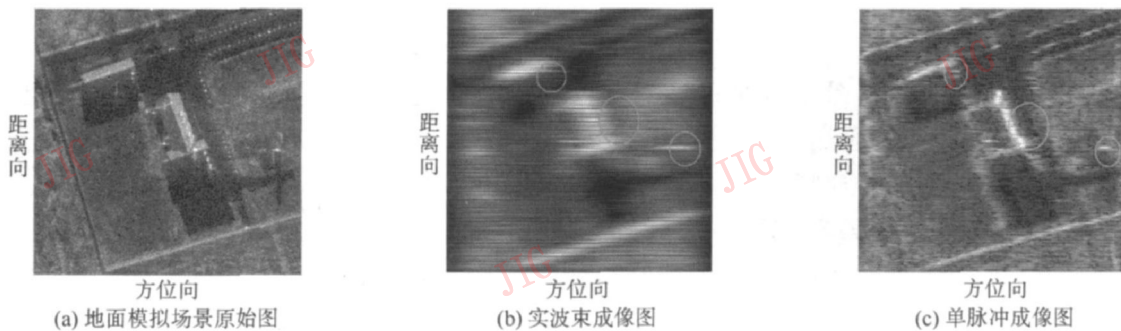


图 10 模拟场景成像仿真图

Fig. 10 Imaging results of simulation scene

#### 4 实测数据处理

最后,对某型机载雷达所录取的一组单脉冲前视数据进行了成像处理,其中主要系统参数如下:

- 和波束主瓣宽度:  $3.8^\circ$
- 天线波束方位角扫面速度:  $50^\circ/s$
- 成像区中心点距离: 50 km
- 脉冲重复频率 (PRF): 780 Hz
- 天线波束方位向扫描范围:  $-50^\circ \sim 50^\circ$
- 载机飞行速度: 90 m/s

图 11 分别为实测数据经实波束和单脉冲成像技术处理后的载机前下方地面图像。从两幅图的对比中可以清楚地看出,单脉冲技术的引用,明显改善了实波束图像成像效果,图像中很多区域方位向精确度和清晰度有了不同程度的提高,给机载雷达对前方区域的探测提供了更为可靠的信息。对成像图的分析表明,本文提出的单脉冲成像方案,能够将图像中不同点的方位分辨率提高约 3~ 10 倍,与文献 [3 7]中的成像结果相似,然而,由于不涉及复杂的运算,本文算法的运算效率完全可以满足实时处理的需要。

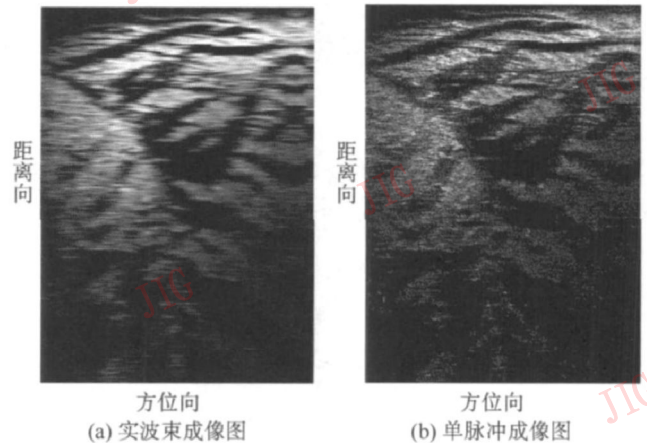


图 11 实测数据成像图

Fig. 11 Imaging results of experimental data

#### 5 结论

由本文分析可以看出,将单脉冲测角技术运用于机载雷达的成像过程中,可以在不同程度上提高成像的质量,从而获得更清晰准确的地貌特征。与 SAR, DBS 技术相比,单脉冲成像对地面目标的多普勒频率没有要求,可用于 SAR, DBS 技术难以实现的前视成像,解决成像的盲区问题,且其涉及的运算量较小,有利于实时实现。因此,这项技术具有较高

的实用价值, 可以广泛使用于载机对前方区域的探测中, 也可以在载机在前方不良着陆点的着陆过程中起到很大作用。

### 参考文献 (References)

- [1] Xie Tuhou. Map display technology of airborne radar [J]. Modern Radar, 2007, 29(2): 28-34. [谢土厚. 机载雷达的地图显示技术 [J]. 现代雷达, 2007, 29(2): 28-34.]
- [2] Skolnik M I. Radar Handbook [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [3] Skolnik M I. Introduction to Radar System [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [4] George W Stinson. Introduction to Airborne Radar [M]. 2nd ed. New Jersey: Scitech Publishing, 1998.
- [5] Sherman S M. Monopulse Principles and Techniques [M]. Norwood, MA: Artech House, 1984.
- [6] Ulrich N ickel. Overview of generalized monopulse estimation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2006, 42(5): 27-56.
- [7] Li Yueli, Liang Diannong, Huang Xiaotao. A multichannel deconvolution based on forward-looking imaging method in monopulse radar [J]. Signal Processing, 2007, 23(5): 700-703. [李悦丽, 梁甸农, 黄晓涛. 一种单脉冲雷达多通道解卷积前视成像方法 [J]. 信号处理, 2007, 23(5): 700-703.]
- [8] Li Tao, Zhang Tao. Preliminary study on monopulse SAR ground moving target detection technology [J]. Fire Control Radar Technology, 2007, 36(4): 26-30. [李涛, 张涛. 单脉冲 SAR 地面动目标检测技术初探 [J]. 火控雷达技术, 2007, 36(4), 26-30.]
- [9] Delano R H. Theory of target glint or angular scintillation in radar tracking [J]. IEEE Proceedings of the IRE, 1953, 41(12): 1778-1784.
- [10] Barton D K. Radar System Analysis [M]. Norwood, MA: Artech House, 1977.
- [11] Cerutti-Mori D, Klare J, Brenner A R, et al. Wide-area traffic monitoring with the SAR/GMTI system PAMIR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 3019-3030.