

基于稀疏综合孔径天线的艇载成像雷达研究

侯颖妮^{1,2}, 李道京¹, 尹建凤^{1,2}, 洪文¹

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要: 基于稀疏综合孔径天线概念, 研究了平流层飞艇载对地观测成像雷达系统中的重要问题. 提出了稀疏阵时分多相位中心孔径综合方法, 该方法使得综合后的相位中心在数量上和分布情况上与满阵天线相同, 从而避免了稀疏阵旁瓣较高的问题; 利用模拟退火算法对阵列进行了优化, 以使实际使用的阵元最少; 为提高系统作用距离, 采用多频正交信号形成多发多收的工作模式, 通过频率拼接提高距离分辨率; 由于综合孔径天线阵列长度远小于场景宽度, 系统采用了子孔径成像方法, 并将曲线拟合和自聚焦处理相结合, 解决了存在阵列形变误差时的精确成像问题. 仿真结果表明了本文方法的有效性.

关键词: 稀疏综合孔径天线; 雷达成像; 多频正交信号; 阵列误差; 平流层飞艇

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)12-2377-06

Airship Imaging Radar Based on Aperture Synthesis of Thinned Array

HOU Ying ni^{1,2}, LI Dao jing¹, YIN Jian feng^{1,2}, HONG Wen¹

(1. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, CAS, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the concept of aperture synthesis sparse antenna, the imaging radar on the stratosphere airship for the earth observation is investigated. The multiple phase centre aperture synthesis method in time division mode is proposed to eliminate the high side lobes of sparse array. Using simulated annealing algorithm to optimize the location of antennas, so as to minimize the number of antennas used. To guarantee the power of transmitter and enhance range resolution, the multiple frequency orthogonal signals have been used to achieve multiple input and multiple output function. For the length of array is far less than the scene width, the sub aperture imaging method is adopted. The curve fitting and PGA(Phase Gradient Autofocus) algorithm have been combined to compensate array error. The simulation results denote the validity of the method proposed in the paper.

Key words: aperture synthesis thinned array; radar imaging; multiple frequency orthogonal signal; array error; stratosphere airship

1 引言

在平流层(20~30km高度)工作的飞艇主要用于区域预警, 利用其体积巨大(在顺轨方向可能长达150~250m)^[1]的特点, 为大尺寸天线雷达实现孔径成像对地观测提供了可能.

较大尺寸的天线为实孔径高分辨率雷达成像创造了条件, 但与之对应的大量天线单元和接收通道, 使雷达系统的体积重量增加. 为覆盖足够的观测范围, 天线波束需扫描或天线应具有同时多波束处理能力, 这使得系统变得更为复杂. 解决上述问题的一个途径就是考虑采用具有稀疏特点的综合孔径天线. 目前, 稀疏综合孔径天线在星载成像辐射计^[2]和地基对空观测雷达^[3,4]都获得了广泛的应用.

综合孔径辐射计的成像视场由子阵天线的波束宽度决定, 而其空间分辨率取决于综合孔径天线尺寸, 但由于采用干涉相关处理技术, 要求目标信号必须互不相关, 这种情况下只适用于测量目标的辐射亮度. 基于综合孔径天线的地基对空观测雷达的子阵通常采用全向天线, 并常工作在米波和L波段, 阵列稀疏化带来的旁瓣较高问题较为严重, 要采用综合处理的方式解决^[3].

基于稀疏综合孔径天线概念, 本文研究了平流层飞艇载对地观测成像雷达系统中的重要问题.

2 系统设计

考虑到雷达艇载的应用条件, 为减少系统的体积重量并获得较好的对地成像性能, 一个工作在X波段, 子阵天线(阵元)采用方位相扫和固态发射, 全阵为稀疏综

合孔径天线(阵列)的雷达系统应是一个合理的选择,显然,这也是一个实孔径成像雷达系统,其工作示意图如图 1 所示。

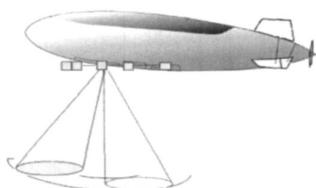


图1 艇载对地观测成像雷达工作示意图

为避免综合孔径天线的栅瓣,阵元的间隔通常不能大于阵元尺寸 D 的一半,但当采用至少两个阵元同时接收时,根据接收等效相位中心原理^[5],阵元间隔可等于阵元的尺寸 D ,这使得综合孔径天线的布阵在物理上容易实现,其工作原理如图 2 所示,图中的 x 为阵元排列方向, z 为垂直高度方向, y 为右手螺旋准则确定的方向, $x-y$ 平面为水平面, R, R_1, R_2 分别代表场景中心到不同阵元的斜距。

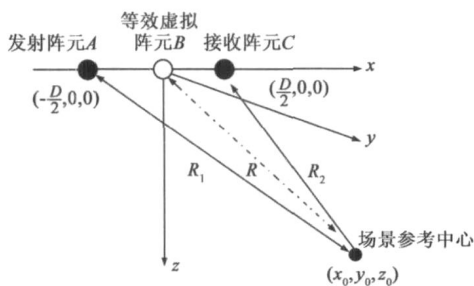


图2 接收等效相位中心原理

当阵元 A 发射,阵元 A 和 C 同时接收时,等效于阵元 A 和等效虚拟阵元 B 同时自发自收,当阵元间距为 D 时,等效阵元间距 $d = D/2$,其中虚拟阵元 B 是新产生的相位中心。由于是稀疏阵列,综合孔径天线的旁瓣比较高,不适于在对地观测条件下使用。

在接收等效相位中心原理下可以产生新的相位中心,利用这个原理,可以考虑优化稀疏天线阵列单元的位置,使在各阵元轮流发射,全阵接收的条件下,所产生的相位中心经去掉冗余数据(保持接收信号幅度均匀)综合处理后,其数量和分布情况和满阵天线相同。

由于孔径综合采用时分方式,存在阵元数和脉冲重复周期之积决定的孔径综合周期,但飞艇悬停和低速运动的特点,使其具备应用条件。

为了得到时分工作方式下的最优阵列,文中采用模拟退火算法^[6]对稀疏阵进行优化排列,优化过程中的关键问题是目标函数的设计。目标函数设计思想为:在一个给定大小的等效满阵天线位置上进行稀疏布置阵元,当各阵元轮流发射,全阵接收的情况下,在一个孔径综合周期获得的相位中心可形成满阵时,使得采用的真实阵元最少。具体设计方法如下:

假设优化后的阵列在 1 到 N 位置不等间隔存在阵元, M 为阵元数, P 为优化后 M 个阵元的位置向量 $P =$

$[1, \dots, N]_{1 \times M}$, J 为全一向量 $J = [1, 1, \dots, 1]_{1 \times M}$, 则目标函数为 $\min(M)$, 约束函数为元素 1, 1.5, 2, ..., $N - 0.5$, $N \in F(M)$, 其中, N 为阵列以阵元尺寸间隔均匀布阵时,需要的阵元数目。

$$F(M) = (P_{1 \times M}^T J_{1 \times M} + J_{1 \times M}^T P_{1 \times M}) / 2 \quad (1)$$

容易看出, $F(M)$ 是一个孔径综合周期获得所有相位中心的集合。

优化后得到的稀疏阵列减少了系统复杂度,在一个周期内综合处理稀疏阵列接收的数据,相当于得到了满阵天线的数据,解决了传统稀疏阵列旁瓣较高问题。

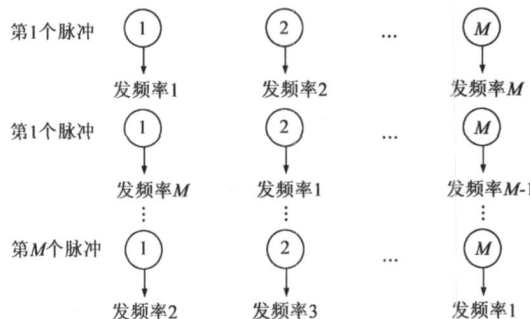


图3 系统收发工作模式

系统采用固态发射机时,由于发射功率较低,不利于提高系统的作用距离;而如果各阵元同时同频发射会产生干涉效应并引起系统的天线方向图畸变,为此,本文提出采用多频正交信号形成多发多收的工作模式,在保证发射功率的同时,通过信号频率的拼接提高系统的距离分辨率。系统具体的收发工作模式如图 3 所示,一个孔径综合周期由 M 个脉冲收发周期组成。显然,在同一脉冲收发周期内,阵列各阵元发射的信号相互正交,同一阵元在不同脉冲下,所发射的信号也相互正交。

3 信号处理方法

上述系统的信号处理包括:对基于等效相位中心原理接收的信号进行相位补偿,通过频率拼接合成宽带信号,子孔径成像处理,以及对系统阵列误差的处理。

3.1 等效相位中心相位补偿

接收等效相位中心原理适用于目标和阵列关系满足远场的条件下,当不满足时就需要根据视场和各收发等效阵元的位置对接收信号进行相位补偿,使等效阵元的接收相当于真实阵元在此位置的接收。

在图 2 中,假定发射阵元位于坐标 $(-D/2, 0, 0)$ 处,接收阵元位于坐标 $(D/2, 0, 0)$ 处,地面上场景中心位于 (x_0, y_0, z_0) ,则通过等效相位中心原理可以认为在两者之间处(原点)存在一阵元自发自收工作。

可以得到等效前后的相位差为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(R_1 + R_2) - \frac{4\pi}{\lambda}R$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} \left[\sqrt{(x_0 + D/2)^2 + y_0^2 + z_0^2} + \sqrt{(x_0 - D/2)^2 + y_0^2 + z_0^2} - 2\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \right]$$

$$+ \sqrt{(x_0 - D/2)^2 + y_0^2 + z_0^2} - \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \quad (2)$$

其中, λ 为雷达工作波长, 令 $r^2 = y_0^2 + z_0^2$, 则上式可写成

$$\Delta\phi \approx \frac{2\pi}{\lambda} \left[r + \frac{(x_0 + D/2)^2}{2r} + r + \frac{(x_0 - D/2)^2}{2r} \right] - \frac{2\pi}{\lambda} \left[r + \frac{x_0^2}{2r} \right] = \frac{\pi D^2}{2r\lambda} \quad (3)$$

当目标位于远场时 $\Delta\phi \approx 0$, 当不满足远场条件时就需对阵元 C 接收信号补偿相位 $-\Delta\phi$, 使补偿后等效于虚拟阵元 B 自发自收。显然, 这种相位补偿方法, 适用于阵元天线波束和幅宽较窄的情况。

3.2 宽带信号合成

为了保证发射功率, 系统采用多频正交信号形成多发多收的工作模式, 故需要对同一相位中心处的各正交信号进行频率拼接以合成宽带信号, 并提高距离分辨力。

假定子阵发射信号为线性调频脉冲信号, 通过合理设计, 可使多频正交信号的频率间隔和子阵信号带宽相等, 此时, 对同一阵元, 通过在不同时刻发射不同频率的线性调频脉冲信号, 不同时刻接收到的回波信号中心频率可写为

$$f_c(n) = f_0 + \left[n - \frac{1}{2} - \frac{M}{2} \right] B_r, \quad n = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

其中, n 为脉冲序号, B_r 为子阵信号带宽, f_0 为系统的中心频率。接收信号经解调后, 各中心频率分别为:

$$-\frac{M-1}{2}B_r, -\frac{M-3}{2}B_r, \dots, \frac{M-3}{2}B_r, \frac{M-1}{2}B_r$$

对在不同时刻获得的不同中心频率的线性调频脉冲信号进行时移处理, 时移量为

$$\Delta t(n) = \left[n - \frac{M}{2} - \frac{1}{2} \right] T_p \quad (5)$$

其中, $\Delta t(n) < 0$ 进行左移, $\Delta t(n) > 0$ 进行右移, 为 T_p 脉冲宽度。将时移后的各信号进行相加, 就可合成带宽为 MB_r 、时宽为 MT_p 的线性调频脉冲信号。

在本文系统工作模式下, 每阵元实际上是在同一空间位置的不同时刻发射接收了多频正交信号, 其宽带信号合成处理应较为简单。

3.3 成像处理

对于稀疏阵列接收数据, 经过等效相位中心的相位补偿、宽带信号合成和孔径综合处理后, 可等同为一满阵天线获取的宽带信号。此时, 基于稀疏阵列形成的综合孔径和传统的合成孔径具有等效性, 该信号可采用合成孔径雷达常用的成像算法进行处理。

考虑到稀疏阵列形成的综合孔径远小于波束宽度决定的场景尺寸, 同时具有大扫描角(等同于 SAR 的斜视角)的特点, 其成像处理可利用基于子孔径数据的 RMA 算法^[7,8]完成。

采用子孔径成像处理时的方位分辨率为

$$\rho_a = \frac{\lambda R}{2L \cos\theta} \quad (6)$$

其中, L 为子孔径长度(这里为稀疏综合孔径天线长度), θ 为天线波束扫描角。

3.4 阵列误差补偿

由于整个阵列天线尺寸较大, 稀疏阵列天线在空中的形变是难以避免的, 研究阵列位置误差的补偿方法, 以增强系统的实用性是必要的。

假定在艇载环境下整个阵列会产生低阶形变, 而阵列位置误差可以利用设置在每个阵元上的测量装置测出, 对测量值进行多项式拟合, 可估计出整个天线的形变情况, 然后利用估计出的阵列形变值在成像过程对误差进行补偿, 从而减小阵列误差的影响。

阵列位置误差补偿分为两部分进行:

第一步是在等效相位中心相位补偿中进行, 以图 2 为例, 设阵列在水平面 y 方向存在形变, Δy_T , Δy_R , Δy_E 分别为真实发射阵元处, 真实接收阵元处, 等效接收阵元处的阵列形变拟合值, 则在阵列误差存在情况下等效相位中心处所需补偿的相位为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\sqrt{(x_0 + D/2)^2 + (y_0 + \Delta y_T)^2 + z_0^2} + \sqrt{(x_0 - D/2)^2 + (y_0 + \Delta y_R)^2 + z_0^2} \right] - \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{x_0^2 + (y_0 + \Delta y_E)^2 + z_0^2} \quad (7)$$

当接收的信号经过式(7)进行相位补偿后, 就可以认为是满阵天线在阵列误差存在时接收的信号。

第二步是在第一步基础上, 对由于阵元位置误差造成的接收回波超前或滞后的相位进行补偿, Δy_i 为孔径综合后阵列的第 i 个相位中心处的形变拟合值, 则对此相位中心处的信号补偿相位应为

$$\Delta\phi_i = -\frac{4\pi}{\lambda} \left[\sqrt{(x_0 + d(i-N))^2 + y_0^2 + z_0^2} - \sqrt{(x_0 + d(i-N))^2 + (y_0 + \Delta y_i)^2 + z_0^2} \right] \quad (8)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, 2N-1$, 这样, 就补偿了由于阵元位置误差造成的相位误差, 使得补偿后的信号相当于是由直线阵接收的信号。

对于曲线拟合后的剩余误差, 可以采用合成孔径雷达常用的 PGA^[9]算法, 进一步完成方位向图像的聚焦处理。此时, 可用聚焦深度划分系统的处理幅宽。

4 实例分析

在 X 波段, 若子阵天线方位向尺寸为 0.6m, 综合孔径天线长度 75m, 在斜距 30km 处, 其方位场景宽度约为 1500m, 根据综合孔径分辨力概念, 此时系统的方位向分辨力为 6m(阵列法线方向)。

对于 75m 长的综合孔径阵列天线, 当阵元间隔为

天线尺寸时,需要天线单元数目 125 个,且不满足天线尺寸和天线间隔的约束关系;当系统采用文中提出的稀疏阵多相位中心综合工作模式时,对阵元位置进行优化后仅需 28 个阵元,一个孔径综合周期综合的相位中心为 249 个,各相位中心间隔 0.3m,优化后各天线单元位于 1, 2, 4, 6, 7, 8, 11, 13, 21, 29, 37, 45, 53, 61, 69, 77, 85, 93, 101, 109, 111, 114, 118, 120, 121, 123, 124, 125 位置,系统详细的参数和性能指标如表 1 所示.

表 1 系统参数和性能指标

中心频率	10GHz	发射脉冲宽度	20μs
子阵数量	28	地物散射系数	-14dB
综合孔径天线长度	75m	接收机噪声系数	3dB
子阵天线尺寸	0.6m × 0.15m	系统损耗	5dB
子阵天线效率	50%	成像信噪比	10dB
子阵天线增益	28dB	入射角	4°
子阵俯仰波束宽度	12°	子阵信号带宽	2MHz
子阵方位波束宽度	3°	系统合成带宽	56MHz
子阵方位相扫范围	±45°	合成斜距分辨率	3m
扫描波驻位置数	30	方位分辨率	6m(法线方向)
脉冲重复频率	4kHz	作用距离	31km
子阵发射峰值功率	10w	孔径综合周期	7ms
全阵发射峰值功率	280w	方位扫描周期	210ms

在上述系统参数下,时分多相位中心孔径综合实现过程如图 4 所示,其中纵坐标数字 1-28 为脉冲数.最下面一行 28 个点表示的是优化后稀疏阵元的位置,中间 28 行分别表示的是稀疏阵 1-28 号阵元轮流发射,每次全阵接收所获得的等效相位中心,最上面一行表示的是中间 28 行相位中心去掉冗余数据,经综合处理后所获得的等效满阵天线的相位中心.

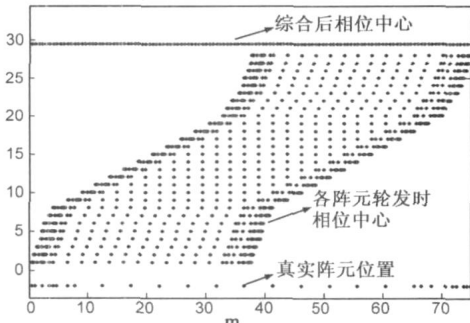


图4 稀疏阵时分多相位中心孔径综合示意图

系统作用距离 R 的计算公式如下所示:

$$R = \left[\frac{P_t \tau G^2 \lambda^3 \rho_r \sigma_0}{(4\pi)^3 K T_0 F_n D A L \sin(\varphi)} \right]^{1/3} \quad (9)$$

其中 P_t 为全阵峰值功率、 τ 为发射脉冲宽度、 σ_0 为地物散射系数、 G 为子阵天线增益、 K 为波尔兹曼常数、 T_0

为绝对温度、 F_n 为接收机噪声系数、 D 为成像信噪比、 L 为系统总损耗、 A_a 为子阵天线方位向尺寸、 ρ 为系统合成距离分辨率、 φ 为入射角.在上述参数下,系统的作用距离优于 31km.

5 仿真结果

在前面分析的基础上,下面通过仿真验证系统在不同波束扫描角的成像性能,以及阵列位置误差补偿方法的效果.假设雷达平台高 22000m,地面参考距离 22000m,斜距约 30000m.其它仿真参数如表 1 所示.

不同天线波束扫描角的仿真结果如图 5 所示.其中设置了 9 个点目标,目标距离向间隔为 100m,方位向间隔为 700m.

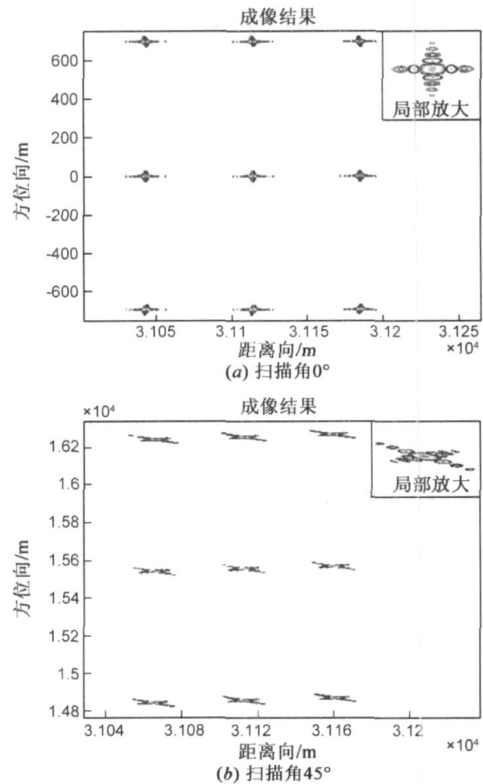


图5 不同扫描角时的成像结果

从上述仿真结果可看出,稀疏综合孔径天线用时分多相位中心孔径综合方法可获得理想的成像效果.

下面的仿真中,假设整个天线阵列上在水平面上存在最大幅度为 0.2m(法线方向)的 2 阶形变,在每个阵元上设置位置测量装置,并假定其测量误差的均方根为 3cm,服从高斯分布.用 28 个测量值对整个天线阵列形变曲线进行三阶拟合,从而估计出其它等效相位中心处的形变值.图 6(a) 给出了仿真情况下阵列真实形变、测量值、拟合值以及拟合偏差;图 6(b) 给出的是阵列误差存在情况下,没有进行任何补偿直接成像结果;图 6(c) 给出的是用阵列形变的拟合值对误差补偿后的成像结

果;图 6(d) 给出的是用形变拟合值对误差补偿后, 进一步采用 PGA 算法处理后的成像结果; 表 2 给出了是图

6(c) 和图 6(d) 场景中心点目标图像质量指标测试结果.

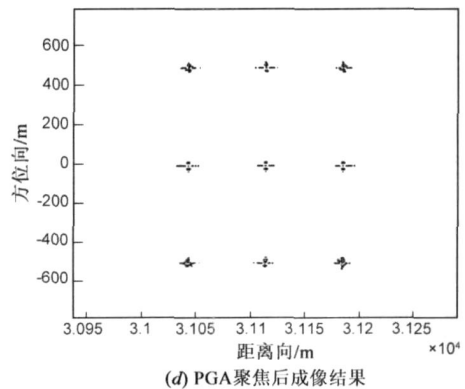
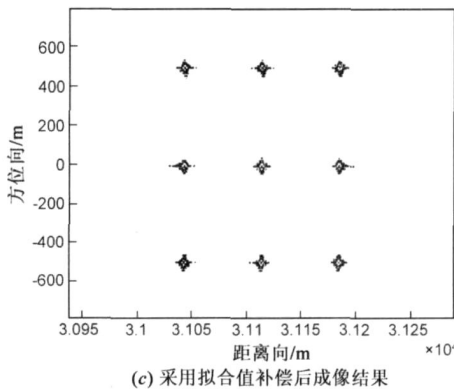
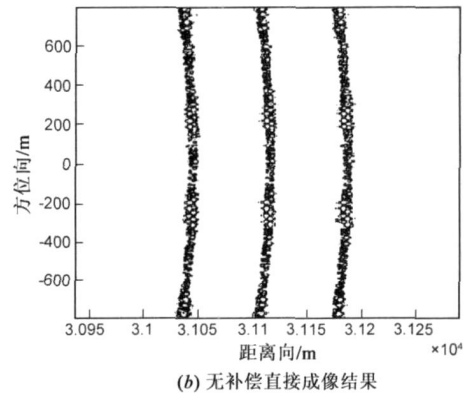
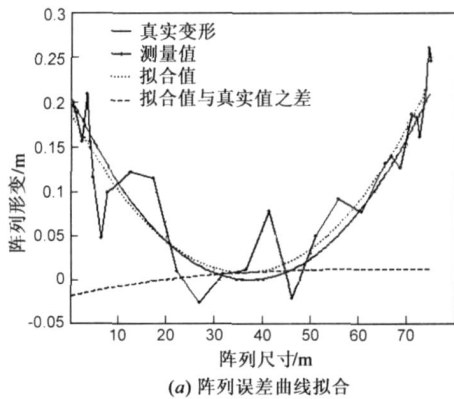


图6 阵列误差及补偿方法对成像结果的影响

表 2 图像质量指标比较

		峰值旁瓣比 (dB)	积分旁瓣比 (dB)	分辨率 (m)
I	距离向	- 13.4291	- 10.5300	2.81
	方位向	- 6.6072	- 2.1510	6.7
II	距离向	- 13.4291	- 10.5300	2.81
	方位向	- 6.6072	- 2.1510	6.7

表 2 中, I 表示采用曲线拟合对误差补偿后的情况; II 表示在曲线拟合补偿的基础上, 再用 PGA 算法进行补偿的情况.

从图 6(b) 可以看出, 在阵列形变误差存在情况下直接成像会产生严重的散焦现象; 从图 6(c) 可以看出, 当采用拟合值对误差补偿后, 成像效果改善明显; 从图 6(d) 和表 2 可以看出, 当采用 PGA 算法对用曲线拟合误差补偿后的图像再进行自聚焦处理, 可以进一步提高图像质量, 证明了本文方法的有效性.

6 结论

本文系统地研究了基于综合孔径天线的艇载雷达对地成像观测问题. 针对平流层飞艇悬停和低速运动的特点, 提出了稀疏阵天线时分多相位中心孔径综合方法, 该方法减少了传统满阵天线中的实际阵元数目,

从而大大减少了系统的复杂性, 且避免了稀疏阵天线旁瓣较高的问题; 利用模拟退火算法优化了阵列位置, 以使实际使用的阵元最少; 为提高系统作用距离, 采用多频正交信号形成多发多收的工作模式, 通过频率拼接提高距离分辨率; 由于综合孔径天线阵列长度远小于场景宽度, 系统采用了子孔径成像方法, 并将曲线拟合和自聚焦处理相结合, 解决存在阵列形变误差时的精确成像问题. 结合一系统实例的仿真结果表明了本文方法的有效性.

假定未来在 X 波段每个收发阵元的重量不超过 3kg, 本文所描述的基于综合孔径天线的艇载成像雷达系统重量将在 100kg 左右, 其应用前景应是令人振奋的.

参考文献:

- [1] C Barbier, B Delaure, A Lavie. Strategic research agenda for high altitude aircraft and airship remote sensing applications [EB/OL]. <http://www.pegasus4europe.com/pegasus/workshop/documents/contributions/Barbier-full.pdf>, 2007-10-20.
- [2] Ruf C S, Swift C T, Tanner A B. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth [J]. IEEE Trans 1988, GRS-26(5): 597-611.
- [3] 保铮, 张庆文. 一种新型的米波雷达综合脉冲与孔径雷

达[J]. 现代雷达, 1995, 2: 1- 13.

Bao Zheng, Zhang Qing wen. A new style metric wave radar synthetic impulse and aperture radar[J]. Modern Radar, 1995, 2: 1- 13. (in Chinese)

- [4] Chen Duofang, Chen Baixiao, Zhang Shouhong. Muti input muti output radar and sparse array synthetic impulse and aperture radar[A]. International Conference on Radar[C]. Shanghai, china: ICR, 2006. 28- 31.
- [5] Li Zhenfang, Bao Zheng, Wang Hongyang, Liao Guisheng. Performance improvement for constellation SAR using signal processing techniques[J]. IEEE Trans, 2006, AES 42(2): 436- 452.
- [6] Ruf C S. Numerical Annealing of low-redundancy linear arrays [J]. IEEE Trans, 1993, AP 40(1): 85- 90.
- [7] M Soumekh. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms [M]. New York: Wiley Interscience, 1999.
- [8] 李道京, 张麟兮, 俞卞章. 近程合成孔径雷达子孔径数据的成像处理[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(3): 282- 286.
Li Dao jing, Zhang Lin xi, Yu Bian zhang. Subaperture data imaging of short range SAR[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18(3): 282- 286. (in Chinese)
- [9] D E Wahl, P H Elchel, D C GhiGlia, C V Jakowatz. Phase gradient autofocus- a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Trans, 1994, AES 30(3): 827- 835.

作者简介:



侯颖妮 女, 1982年3月生于陕西省西安市, 现为中国科学院电子学研究所博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理及雷达成像技术。
E mail: houyingni@ 163. com



李道京 男, 1964年11月生于陕西省西安市, 现为中国科学院电子学研究所研究员, 主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理。
E mail: lidj@mail. ie. ac. cn

尹建凤 女, 1981年12月生于内蒙古赤峰, 现为中国科学院电子学研究所博士研究生, 主要研究方向为合成孔径雷达的运动目标检测与成像。

E mail: glidingyin@ 163. com

洪文 女, 1968年6月生于陕西省西安市, 现为中国科学院电子学研究所研究员、博士生导师, 主要研究领域为雷达信号处理理论、合成孔径雷达成像算法、微波遥感图像理解及其应用等。

E mail: whong@mail. ie. ac. cn.