

文章编号: 2095-4980(2015)03-0423-08

MIMO-SAR成像技术发展机遇与挑战

孟藏珍^{1,2}, 许 稼³, 谭贤四¹, 李贵祥¹, 彭应宁²

(1.空军预警学院 陆基预警装备系, 湖北 武汉 430019; 2.清华大学 电子工程系, 北京100084;
3.北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘 要: 从军事应用及民用领域对合成孔径雷达(SAR)的新需求出发, 分析了传统的 SAR 应对新需求所面临的技术困境; 介绍了新体制多输入多输出合成孔径雷达(MIMO-SAR)系统的技术优势和可能应用, 以及在实际应用中可能面临的技术瓶颈。最后, 重点介绍了同频码分 MIMO-SAR 技术瓶颈的主要解决方法。

关键词: 多输入多输出技术; 合成孔径雷达; 多信号分离; 频率分集

中图分类号: TN958

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201503.0428

Development opportunities and challenges of MIMO-SAR imaging technology

MENG Cangzhen^{1,2}, XU Jia³, TAN Xiansi¹, LI Guixiang¹, PENG Yingning²

(1.Air Force Early Warning Academy of PLA, Wuhan Hubei 430019, China; 2.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3.School of Information and Electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the new application demands of Synthetic Aperture Radar(SAR) in the military and civil fields, the technical difficulties faced by traditional SAR system are analyzed to meet the aforementioned new requirements. Then the technical superiority and potential applications are introduced about the new-system Multiple Input Multiple Output SAR(MIMO-SAR), and the technical bottleneck is described in the application for MIMO-SAR. Finally, the main solutions are summarized to resolve the technical dilemma faced by MIMO-SAR working in the same frequency coverage.

Key words: Multiple Input Multiple Output technology; Synthetic Aperture Radar; multiple waveforms separation; frequency diversity

在现代战争中, 有效获取战场信息对战争的结局起着重要的作用。雷达作为获取信息的有效手段之一, 一直是各国竞相发展的焦点^[1]。雷达最早诞生于第二次世界大战, 当时英国就是凭借雷达的预警功能提前发现来袭德军飞机, 出色地完成了伦敦保卫战。随之雷达技术备受关注而且发展迅速, 但是其研究重点主要围绕“如何实现点对点目标的高概率检测”, 亦即解决“看得见”的问题^[2]。

但在1951年, 美国Goodyear Aircraft公司的工程师Carl Wiley在研究机载侧视雷达的应用中发现, 若2个固定目标在沿飞机航向方向存在一定视角差时, 它们的多普勒频率是可以分辨的, 也即通过多普勒锐化处理是可以提高目标的方位向分辨力的^[3]。以该概念为基础的合成孔径雷达(SAR)随之而生。SAR系统通过发射宽带信号, 在接收端通过采用脉冲压缩技术来获得距离向高分辨力图像, 而在方位向则通过合成孔径技术来获取高分辨的方位图像, 由此获得一幅静态场景的高分辨图像^[4]。SAR技术的诞生使得雷达从单一点目标检测实现到大面积场景成像质的飞跃, 且其所能提供的目标信息也更丰富。由于合成孔径雷达具有全天候、全天时、宽幅、高分辨成像等优势, 被广泛应用在军事侦察、环境监测、地质勘探、灾情预报等军事领域和民用领域。但是, 随着军事应用和民用需求的进一步拓展, 对SAR系统性能和多功能应用也提出了更高的要求, 面对这些新的需求, 对传统单通道SAR而言, 是一个巨大的挑战, 面临诸多技术困境, 急需寻求一种新体制的SAR系统。针对近年来出现的多输入多输出合成孔径雷达(MIMO-SAR)这一新体制SAR系统的相关问题, 本文作一简单梳理: 首先总结了传统单通道SAR系统面对新的应用需求所面临的技术困境; 其次, 阐述了MIMO-SAR技术的优势, 进一步说明MIMO-SAR是解决上述难题的有效途径; 最后, 讨论了MIMO-SAR系统在实际应用中所面临的技术困境以及可能的解决方法。

收稿日期: 2014-11-03; 修回日期: 2014-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271391; 61201451)

1 传统单通道SAR面临的技术困境

1.1 SAR应用面临的新需求

SAR技术已臻成熟,可以实现大面积静态场景成像,能提供远丰富于传统点目标检测雷达的目标信息。但无论是军事应用还是民用需求,对于目标信息最大化的追求是一致的。因此,随着实际应用需求的不断升级,对SAR系统的性能指标要求越来越高,功能需求也日益增多。概括来说,主要体现在以下几点^[5]:

1) 对SAR系统的分辨力指标要求日益提高

囿于器件水平的限制,早期的SAR系统的分辨力在百米、几十米的量级,随着技术发展不断改善到米的量级,甚至更小。但在现代高科技军事战争中,仅停留在原有“看得见”的水平是无法满足要求的,而是期望看得更清楚,最好是能实现目标识别。总而言之,就是需要细节信息更丰富、重构质量更高的图像。因此,唯有进一步提高SAR系统的分辨力,达到亚毫米甚至更低量级。

2) 对测绘带宽的需求日益扩大

早期SAR系统的测绘带宽较窄,只有几公里乃至几十公里,无法满足现代高科技战争对战场信息的需求。尤其是随着现代高速飞行器的出现及广泛应用^[6],现代战场日益宽阔,纵深更长,跨度更大,由此对目标观测区域的拓展是必须的。此外,在民用领域也期望实现尽可能宽广的观测区域,如地图测绘、灾情监测等,大测绘带宽能够降低应用成本,缩短反应时间等。所以说,进一步扩大SAR系统的测绘带宽也将是传统SAR系统发展面临的一个重要挑战。

3) 对复合功能的需求

SAR系统最早主要用于对静态场景成像,但随着军事应用需求的不断拓展,原来单一的功能已无法满足要求。在现代高科技战争中追求发现即摧毁。因此,SAR系统在提供高质量的重构图像时,若能对场景内的目标实现同步检测、成像、定位等^[7-10],则可满足军方最大需求。如美国的E-8预警机上装载的联合监视目标攻击雷达系统、“掠食者”无人机上的多传感器探测系统等^[11],这些系统在海湾、阿富汗等战争中在获取情报、战场监视以及精确打击等方面发挥了重要的作用。因此,新的需求需要SAR具有更多的复合多功能设计。

1.2 传统SAR应对新需求面临的技术困境

面对SAR应用新需求,传统的单通道SAR系统已不能满足要求,在SAR系统参数设计、系统实现等诸多方面受到制约。主要表现在以下几方面^[5]:

1) 大测绘带宽与方位高分辨力之间的矛盾

由SAR原理可以知道,为防止方位向信号出现模糊,雷达重复频率 F_r 必须满足:

$$F_r > B_a = \frac{2v_s}{D} \quad (1)$$

式中: B_a 是方位多普勒带宽; v_s 是平台飞行速度; D 为方位孔径。而SAR系统的方位向分辨力为 $\rho_a = D/2$ 。结合式(1)可以看出,提高SAR方位向分辨力则需要提高雷达重复频率。

在距离向上避免出现距离模糊,则需要确保测绘带内所有散射点的回波在一个重复周期内到达接收机,所以测绘带宽 W_s 必须满足^[12]:

$$W_s < \frac{c}{2 F_r \sin \alpha} \quad (2)$$

式中: c 为光速; α 为地面入射角。从式(2)可以看出,测绘带宽与雷达重复频率的变化趋势是相反的。综合上述分析可以得出,大测绘带宽与方位高分辨力之间是一对不可调和的矛盾^[13]。

2) 进一步提高距离向分辨力难度大

由雷达原理知道,距离向的分辨力决定于雷达信号的瞬时带宽,即满足^[14]:

$$\rho_r = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

式中 B 为信号带宽。从式(3)可知,要提高雷达的距离向分辨力,只能通过发射更大宽带的信号来实现。举个例子,若要实现1 mm的距离分辨力,则需要信号带宽为150 GHz。瞬时带宽这么大的信号,对于现有的器件水平来说难以实现;再者,对后续的信号处理也是一个巨大的挑战。一是接收机的滤波器设计难以满足要求,二是很难找到如此高的A/D采样器件,不利于后续数字信号处理的实现。

3) 系统自由度(Degrees of Freedom, DOF)提高难

对于传统单通道SAR而言,由于是单发单收结构,其系统自由度就是1。但新应用需求中需要进行复合多功能设计,则需要更高的系统自由度。虽有学者提出采用多天线或多通道SAR系统^[15-16],但由于采用单发多收机制,系统自由度取决于接收天线的个数,这相比于常规单通道SAR而言,系统自由度有所增加,但对于尺寸受限、载荷量有限的SAR平台,不可能无限制地增加雷达接收天线。所以,急需寻求一种新的技术方法,在收发天线数量有限的情况下,却能获得同样大甚至更大的系统自由度。

2 MIMO-SAR的技术优势及可能应用

多输入多输出技术(MIMO)最早被应用在通信系统中,以克服多径效应^[17]。后由林肯实验室的Bliss D W和Forsythe K W将其引入到雷达领域,提出基于MIMO技术的新体制雷达^[17],利用多发射波形和多接收机通道来获取远大于单发单收系统的DOF,从而可采取更灵活的信号处理方式来提高雷达性能,如目标检测、参数估计、成像等^[18]。

受此思想的启发,为解决SAR系统面临的新需求,学者Ender J H G率先将MIMO技术引入到合成孔径雷达系统^[19],提出了MIMO-SAR。利用MIMO技术获得多个等效SAR通道,来突破传统单通道SAR系统的技术局限。假设MIMO-SAR系统有 M 个发射波形, N 个接收通道,根据MIMO技术原理,则最大可获得 $M \times N$ 个等效接收通道,为解决上述单通道面临的新需求中遇到的问题提供了一个有效的解决途径。

2.1 带宽合成技术

由于MIMO-SAR有多个发射天线,可以同时发射多个独立的信号。当各发射信号是频分信号时,即各发射信号在不同的中心频点上,各信号在频带上的覆盖可以相互部分重叠,彼此毗邻,也可以相互之间有一定间距,总体来看,这组信号覆盖了一个较宽的频带范围。因此,可采用带宽合成技术获得一个等效的大带宽信号^[20],即可获得距离上的高分辨力图像,克服了常规SAR系统采用超宽带信号提高距离分辨力的缺点。

2.2 等效虚拟阵列技术

由MIMO-SAR的定义^[19]可知,MIMO-SAR应该属于紧凑式MIMO雷达,它能利用的MIMO技术优势在于通过发射多个正交波形和多个独立的接收通道,利用虚拟阵列原理^[21],来获取远多于实孔径数的接收通道,从而解决单通道SAR面临的困境,其原理如图1所示。

从图1可以看出,等效阵元的位置在发射阵元与接收阵元之间连线中点上,也即由上述的发射分置构成的系统可等效为在等效阵元位置的收发同置的系统。因此,对于MIMO-SAR系统来说,可等效提高方位向的空间采样,在保证方位向信号不模糊的条件下,可降低雷达重复频率,等效为扩展了测绘带宽,即解决了测绘带宽与方位向高分辨之间的矛盾。

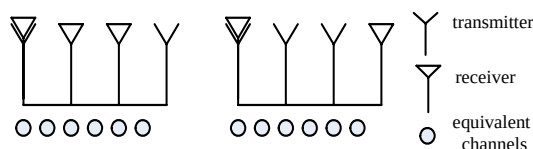


Fig.1 Diagram of virtual array principle
图1 虚拟阵列原理示意图

2.3 MIMO-SAR的可能应用

利用MIMO-SAR的技术优势,在实际可以有多种应用模式。MIMO-SAR有多个发射和接收天线,因此阵列可以有多种布置形式。考虑到SAR成像信号处理的便利及图像重构质量,阵列线形布置是最佳的选择,阵列布置原则及方法在文献[11]中有较为详细的讨论,在此不再赘述。

根据阵列布置情况不同,MIMO-SAR主要有如下几种应用模式:

1) 沿航线布设收发阵列,主要有单相位中心和多相位中心MIMO-SAR,如图2、图3所示。

图2为单相位中心MIMO-SAR原理示意图,其核心思想是在接收时多接收天线将方位向波束划分为多个子接收波束,这样各子接收波束的回波信号多普勒频谱彼此衔接且互不重叠,通过频谱合成即可得到大的多普勒带宽,在较小雷达重复频率下获得了较高的方位向分辨力,即解决了上述传统SAR的技术困境^[12]。

图3是多相位中心MIMO-SAR的原理图,在方位向多接收天线波束覆盖相同的范围,通过多相位中心等效原理^[12],在一次脉冲重复周期内即可等效获得多次方位向空间采样,这样同样可以达到在较低的雷达重复频率下获得高方位分辨力的目的。

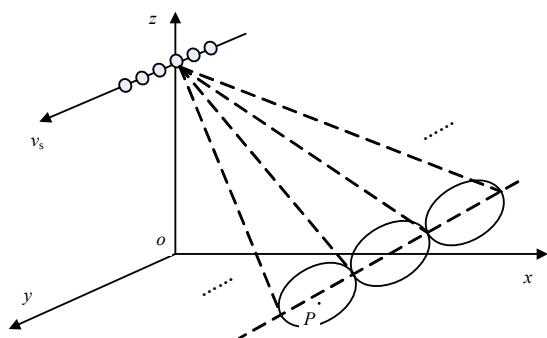


Fig.2 Mono-phase-center MIMO-SAR
图2 单相位中心MIMO-SAR

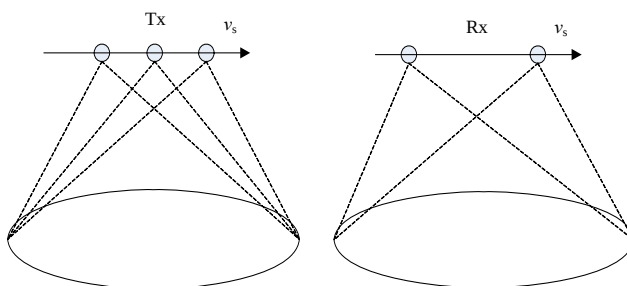


Fig.3 Multiple-phase-center MIMO-SAR
图3 多相位中心MIMO-SAR

单相位中心与多相位中心MIMO-SAR其区别主要体现在方位向信号处理上的不同,前者是通过多普勒频谱合成的方式来消除方位向信号的模糊;而后者是时域处理,通过空时等效采样来提高方位向采样率,从而达到方位高分辨的目的。

2) 沿距离向布设收发阵元,如图4所示。

图4显示了子带分割的方法,在保持较高的雷达重复频率时,通过多个子带合成来扩展测绘带宽。实际上,在应用中距离向MIMO-SAR还有一种应用模式。当多个发射波形覆盖不同频率带宽时,可通过带宽合成^[20]来提高距离向的分辨力,当然此时在宽测绘带与方位向高分辨之间要做出权衡。

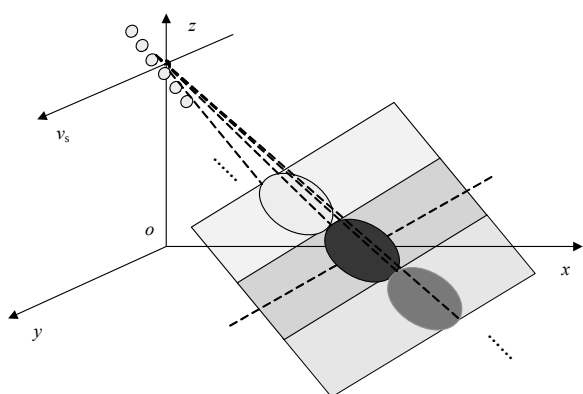


Fig.4 MIMO-SAR with multiple antennas in the range(equivalent array)
图4 距离向多天线MIMO-SAR(等效阵列)

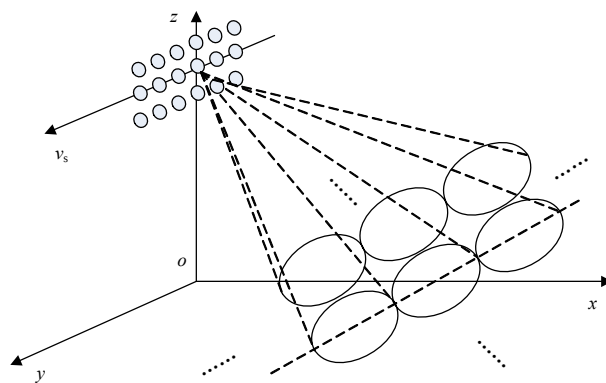


Fig.5 MIMO-SAR combined with multiple antennas in the range and azimuth(equivalent array)
图5 方位向和距离向联合多天线MIMO-SAR(等效阵列)

3) 方位向和距离向都布设阵元的情况,即前2种情况的综合,因此具备前2种应用模式的优势。其原理图如图5所示,在此不再赘述。

3 MIMO-SAR应用面临的技术挑战

MIMO-SAR根据发射信号的不同,可分为频分MIMO-SAR和同频码分MIMO-SAR。实际应用中,这2种MIMO-SAR系统都将面临着不同的技术困境,也限制了其进一步的发展,这也是下一步MIMO-SAR技术研究的重点。

3.1 频分MIMO-SAR面临的挑战

由雷达目标特性可知,目标的特征函数可表示为^[22]:

$$\sigma(\mathbf{R}, t) = \iiint_{V_{K,\omega}} A(\mathbf{K}, \omega) \exp[j(\omega t + \mathbf{K} \cdot \mathbf{R})] d\omega d^3 \mathbf{K} \quad (4)$$

式中: $A(\mathbf{K}, \omega)$ 为归一化散射场矢量函数; $\mathbf{K}$ 为波矢量,与自由空间波数 $2\pi/\lambda$ 相关; ω 为雷达工作角频率; $\mathbf{R}$ 为目标的位置矢量。

从式(4)可以看出,目标的散射系数与波长相关,即雷达波长不同,其散射系数也不同。因此,对于频分MIMO-SAR来说,由于多个发射波形中心频率不同(即雷达波长 λ 不同),所以各发射波形的目标散射系数不同。而SAR成像系统是一个相干处理系统,因此,上述目标散射特性的频率分集效应对MIMO-SAR系统的应用带来巨大挑战。在上文介绍的MIMO-SAR诸多应用中,对于频分MIMO-SAR来说都可能受到限制,如图6所示。图中实线表示方位信号相干时得到的聚焦图像,而虚线和点划线分别表示方位信号因为频率分集的影响相干性变差时的重构图像,频率分集程度不同则重构图像的聚焦程度也对应不同,最糟糕的情况就是可能得不到聚焦的图像,如点划线所示。

所以,对于频分MIMO-SAR系统来说,其各发射波形的回波因为频谱上的差异较容易分离开,但由于各发射波形回波信号之间相干性变差甚至不相干,对MIMO-SAR这个相干处理系统而言,其将如何应用,有必要进一步展开讨论,而不是简单地将MIMO技术套用到SAR系统。

3.2 同频MIMO-SAR应用面临的挑战

同频码分MIMO-SAR系统没有目标散射特性的频率分集效应,要真正解决传统单通道SAR面临的诸多困境,同频码分MIMO-SAR能真正发挥MIMO技术的优势并担此重任。但由于需要各发射波形间完全正交,这在实际中无法满足。有学者已经证明,对于一组同频编码信号,其积分旁瓣电平(Integrated Side-lobe Level, ISL)满足^[23]:

$$\text{ISL} \geq M^2 L^2 - M L^2 = L^2 M(M-1) \quad (5)$$

式中: M 为正交波形个数; L 为码长。图7显示了上述3个参数之间的关系。

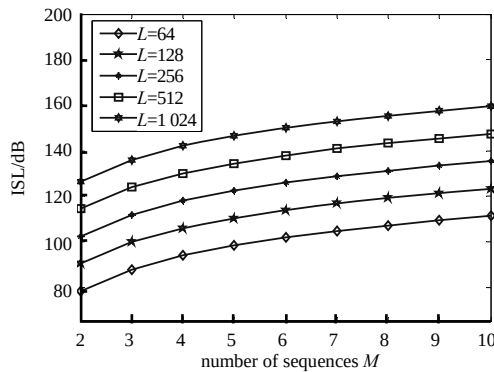


Fig.7 ISL lower bound
图7 ISL下界曲线

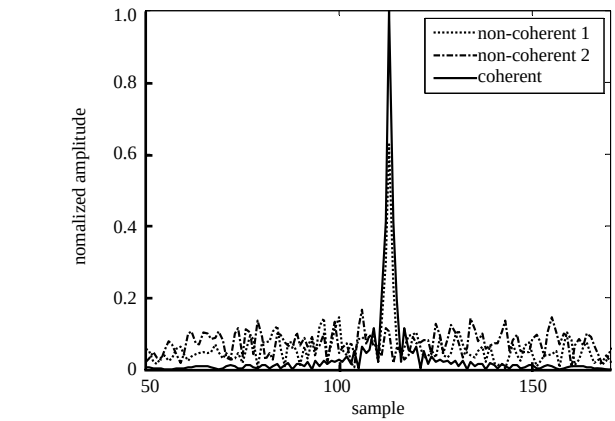


Fig.6 Frequency diversity effect on target backscattering coefficient
图6 目标散射频率效应

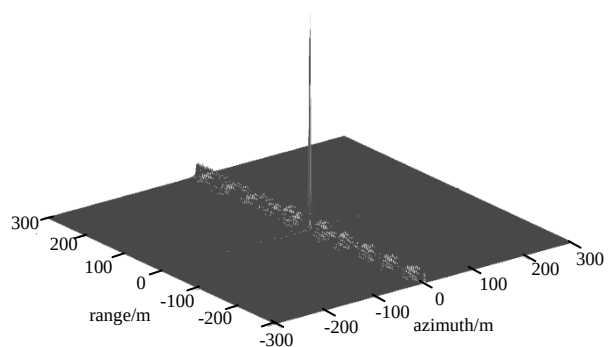


Fig.8 Reconstructed image of scatterer (with cross-correlation noise)
图8 散射点重构图像(有互相关噪声)

对于MIMO-SAR,文献[24]进一步证明:由于波形之间互相关因素的影响,当波形数大于2时,重构图像的面积旁瓣比要大于0 dB,显然对于SAR成像来说是不能接受的。图8所示是一个有3个正交编码发射波形时的散射点重构图像,从图中可以看出,由于波形间的互相关影响,距离向的副瓣电平被整体抬高,致使SAR重构图像的质量严重恶化。

因此,对于同频码分MIMO-SAR系统应用来说,如何有效分离各发射波形的回波,抑制波形间的互相关影响,是制约其工程应用的瓶颈。也可以说,若这个问题解决不了,同频码分的MIMO-SAR只能是空中楼阁。

4 MIMO-SAR技术困境的可能解决方法

从上文的论述可以知道,同频码分MIMO-SAR系统在实际中有着更大的应用前景,本文因限于篇幅,下文主要简介同频码分的MIMO-SAR面临的技术困境可能的解决方法。要解决这个问题,主要目的是要抑制波形之间的相互干扰,即互相关噪声。目前,有学者从失配处理、信号分离以及基于复图像域的后处理等角度对该问题进

行了较为全面的讨论。

4.1 基于失配处理的解决方法

从文献[23]的讨论可知,式(5)是因为基于传统匹配滤波的方法,利用信号之间的正交性来实现信号分离,由于实际中难以找到相互之间完全正交的波形,所以存在上文描述的影响在所难免。沿着其思路,有学者从失配处理的角度对这个问题进行了讨论。文献[25]提出基于辅助变量方法重新设计接收滤波器,替代原有匹配滤波器来实现信号波形之间的分离,大大抑制了多波形之间的互相关噪声的影响。

4.2 基于信号预分离的解决方法

无论是匹配处理还是采用失配滤波器来进行多波形之间的分离,都是将波形分离与距离像重构统一起来处理的。从前面论述知道,要解决同频码分MIMO-SAR系统的上述瓶颈问题,关键是要有效分离各发射波形的回波。因此,有学者考虑在MIMO-SAR系统前端增加信号预处理环节来完成信号分离。新的MIMO-SAR处理流程如图9所示。

根据上述思路,文献[26]提出了一种脉间调制的多普勒距离解耦滤波器方法。该方法利用机载SAR雷达重复频率一般远大于方位回波信号的多普勒带宽,通过脉间调制技术使得在多普勒域原本重叠在一起的多回波信号彼此可分,这样通过一组距离多普勒解耦滤波器即可完成多波形的有效分离,从而很好地解决了多波形之间的耦合影响问题。

文献[27]利用波形的极化信息提出了基于虚拟极化滤波的多波形分离方法。为了利用极化信息,特提出一种两发多收的极化MIMO-SAR系统,在发射端,发射2个极化特性互相正交的波形,在接收端,每一个接收天线完成全极化接收。由于目标的极化特性调制,回波信号的极化特性已发生改变,一般情况下不再相互正交。这时先进行极化参数的估计,然后利用估计的极化参数来构建波形分离滤波器,最终实现多波形的分离。

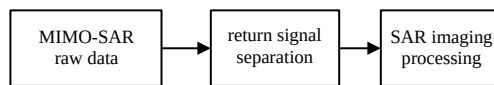


Fig.9 Flow of MIMO-SAR processing
图9 MIMO-SAR处理流程

4.3 基于复图像域后处理的解决方法

上述解决方法按照处理流程,可归纳为在信号域的处理。文献[28]在复图像域,利用波形正交性设计后,波形自相关远大于波形互相关的特性,在距离向复图像域提出了基于Clean方法的波形分离方法,取得了较好的效果。但由于算法的特点,主要适用于有限强散射点成像。

综上所述,针对同频码分MIMO-SAR应用中面临的多波形间互噪声干扰问题,从多角度提出解决方法,取得了一定的效果。但各类方法均有一定的约束条件。因此,这个问题远没有解决,有待进一步的研究。

5 结束语

MIMO-SAR是近年来掀起研究热点问题之一,是有望解决传统单通道SAR面临的困境的新体制SAR系统,有着重要的理论研究价值和工程意义。本文首先总结了现代军事及民用领域对SAR系统的新需求,然后梳理了传统单通道SAR面对新需求所面临的技术困境。其次,介绍了MIMO-SAR系统的技术优势及可能应用;最后,讨论了MIMO-SAR系统在实际应用中面临的技术瓶颈,重点分析解决同频码分MIMO-SAR系统多波形间互相关影响的几种方法。对于频分MIMO-SAR来说,重点需要讨论在目标散射特性频率分集效应的影响,而同频码分MIMO-SAR系统则需要研究如何有效分离各发射波形的回波信号,这也是进一步将MIMO-SAR工程化应用的前提和基础。

参考文献:

- [1] 梁美彦,邓朝,张存林. 太赫兹雷达成像技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):189-198. (LIANG Meiyan, DENG Chao,ZHANG Cunlin. THz radar imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):189-198.)
- [2] Woodward P M. Information theory and the design of radar receivers[J]. Proceedings of the IRE, 1951,39(12):1521-1524.
- [3] Wiley C A. Synthetic Aperture Radars[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985,AES-21(3):440-443.
- [4] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (BAO Zheng,XING Mengdao,WANG Tong. Radar Imaging Technique[M]. Beijing:Publishing House of Electronic Industry, 2005.)
- [5] 孟藏珍. 多输入多输出合成孔径雷达多波形分离方法研究[D]. 北京:清华大学, 2014. (MENG Cangzhen. Research on the algorithm of multiple waveforms separation for Multiple Input Multiple Output Synthetic Aperture Radar[D]. Beijing:

- Tsinghua University, 2014.)
- [6] 宋小全,韦震,韩中生,等. 太赫兹波应用于临近空间高速飞行器测控研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(4): 512–517. (SONG Xiaoquan,WEI Zhen,HANG Zhongsheng,et al. Research on application of terahertz technology to near-space hypersonic spacecraft tracking telemetry and command[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(4):512–517.)
- [7] XU J,ZUO Y,XIA B,et al. Ground moving target signal analysis in complex image domain for multichannel SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012,50(2):538–552.
- [8] LI Z F,BAO Z. A novel approach for wide-swath and high-resolution SAR image generation from distributed small spaceborne SAR systems[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006,27(5):1015–1033.
- [9] Henke D,Magnard C,Frioud M,et al. Moving-target tracking in single-channel wide-beam SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012,50(11):4735–4747.
- [10] PENG S B,XU J,PENG Y N,et al. Parametric inverse Synthetic Aperture Radar manoeuvring target motion compensation based on particle swarm optimiser[J]. IET Radar,Sonar and Navigation, 2011,5(3):305–314.
- [11] 王力宝. 多输入多输出合成孔径雷达关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010. (WANG Libao. Research on challenge technologies of MIMO-SAR[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2010.)
- [12] 王文钦. 多天线合成孔径雷达成像原理与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2012. (WANG Wenqin. Multiple antennas Synthesis Radar Imaging Theory and Algorithm[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2012.)
- [13] Currie A,Brown M A. Wide-swath SAR[J]. IEE Proc-F,Radar and Signal Processing, 1992,139(2):122–135.
- [14] 理查兹. 雷达信号处理基础[M]. 北京:电子工业出版社, 2008. (Richards. Fundamentals of Radar Singal Processing[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [15] Gebert N,Krieger G,Moreira A. Digital beamforming on receive:techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009,45(2):564–592.
- [16] Gebert N,Krieger G. Azimuth phase center adaptation on transmit for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009,6(4):782–786.
- [17] Bliss D W,Forsythe K W,Hero A O,et al. Environmental issues for MIMO capacity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002,50(9):2128–2142.
- [18] XU J,DAI X Z,XIA X G,et al. Optimizations of multisite radar system with MIMO radars for target detection[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2011,47(4):2329–2343.
- [19] Ender J H G. MIMO–SAR[C]// Proc. of Int. Radar Symp. (IRS). Cologne,Germany:[s.n.], 2007:580–588.
- [20] 戴喜增. MIMO 雷达分集检测和带宽合成的理论与方法研究[D]. 北京:清华大学, 2008. (DAI Xizeng. Research on the theory and method of diversity detection and bandwidth synthesis for MIMO radar[D]. Beijing:Tsinghua University, 2008.)
- [21] Bekkerman I,Tabrikian J. Target detection and localization using MIMO radars and sonars[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006,54(10):3873–3883.
- [22] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (HUANG Peikang,YIN Hongcheng,XU Xiaojian. Radar Target Characteristics[M]. Beijing:Publishing House of Electronic Industry, 2005.)
- [23] HE H,Stoica P,LI J. On aperiodic-correlation bounds[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010,17(3):253–256.
- [24] ZOU B,DONG Z,LIANG D N. Design and performance analysis of orthogonal coding signal in MIMO-SAR[J]. Science China-Information Sciences, 2011,54(8):1723–1737.
- [25] 孟藏珍,许稼,花良发,等. 基于接收滤波器设计的 MIMO-SAR 波形耦合抑制[J]. 电波科学学报, 2014,29(3):401–407, 423. (MENG Cangzhen,XU jia,HUA Liangfa,et al. MIMO-SAR waveform coupling suppressing based on design of receiving filter[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014,29(3):401–407,423.)
- [26] MENG C Z,XU J,XIA X G,et al. MIMO-SAR waveform separation based on inter-pulse phase modulation and range-doppler decouple filtering[J]. Electronics Letters, 2013,49(6):420–421.
- [27] MENG C Z,XU J,XIA X. G,et al. MIMO-SAR waveforms separation in same frequency area based on virtual polarization filter[J]. Science China Information Sciences, 2015,58(4):042301(1–12).
- [28] 孟藏珍,许稼,王力宝,等. 基于 Clean 处理的 MIMO-SAR 正交波形分离[J]. 电子与信息学报, 2013,35(12):2809–2814. (MENG Cangzhen,XU Jia,WANG Libao,et al. An orthogonal waveform separation method based on clean processing in MIMO-SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013,35(12):2809–2814.)

作者简介:



孟藏珍(1978-), 男, 安徽省宿松县人, 博士, 讲师, 主要从事雷达信号处理、雷达数据处理、数据融合以及 SAR 成像等方向研究.email: mcz_zzhp@sina.com.

李贵祥(1968-), 男, 武汉市人, 副教授, 主要从事雷达系统、特种雷达装备等方面的研究.

许 稼(1974-), 男, 安徽省绩溪县人, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号检测与处理、数据融合处理、SAR 成像等方面研究.

谭贤四(1965-), 男, 湖南省新宁市人, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达系统、雷达数据处理等方面研究.

彭应宁(1939-), 男, 四川省郫县人, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号处理、谱估计、阵列信号处理、自适应滤波等方向研究.

(上接第 418 页)

参考文献:

- [1] 沈佳峰. 民机 TCAS 机动策动策略与仿真研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011. (SHEN Jiafeng. Study on maneuver strategy and simulation for TCAS of civil aircraft[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2011.)
- [2] 姚凤艳. 机载防撞系统中监视功能的研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (YAO Fengyan. Research and design of surveillance in airborne collision avoidance system[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [3] LI X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking-part I:dynamic models[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2003,39(4):1333-1364.
- [4] 周宏仁,敬忠良,王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京:国防工业出版社, 1991. (ZHOU Hongren, JING Zhongliang, WANG Peide. Maneuvering Target Tracking[M]. Beijing:National Defence of Industry Press, 1991.)
- [5] Pearson J B, Stear E B. Kalman filter applications in airborne radar tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1972(10):319-329.
- [6] Mazor E, Averbuch A, Bar-Shalom Y, et al. Interacting multiple model methods in target tracking:A survey[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998,34(1):103-124.
- [7] Pollard E, Pannetier B, Rombaut M. Hybrid algorithms for multitarget tracking using MHT and GM-CPHD[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2011,43(2):832-847.
- [8] Panta K, Clark D E, Vo B-N. Data association and track management for the Gaussian mixture probability hypothesis density[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2009,45(3):1003-1016.

作者简介:



王 力(1984-), 男, 四川省宜宾市人, 硕士, 工程师, 主要从事机载雷达多目标跟踪、资源管理研究.email:wang_li_apple@163.com.

高 霞(1984-), 女, 陕西省米脂县人, 硕士, 工程师, 主要从事机载雷达信号处理研究.