# 多维度合成孔径雷达成像概念

吴一戎*
(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

**摘 要：** 该文通过回顾合成孔径雷达(SAR)成像技术的发展历程，论述了在极化、频率、角度和时相空间内开展多样本联合观测的内涵、必要性及发展趋势。在此基础上，基于信息综合利用的需求建立了多维度 SAR 成像的基本定义，描述了多维度 SAR 成像的特点，并提出了基于克罗内克积分解技术的观测对象散射机理描述方法。最后列出了多维度 SAR 信号处理框架和基本假设条件，建立了 SAR 工作方式的多维度表述及多维度数的定义方法。

**关键词：** 多维度合成孔径雷达 (MSJosSAR)；散射机理；克罗内克积分解
**中图分类号：** TN95 **文献标识码：** A **文章编号：** 2095-283X(2013)02-0135-08
**DOI**: 10.3724/SP.J.1300.2013.13047

# Concept of Multidimensional Space Joint-observation SAR

Wu Yi-rong
(*Institute of Electronics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

**Abstract**: The objective of this study is to investigate the connotation, necessity, and tendency of Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging technology within the framework of multidimensional space joint-observation, which includes polarimetry, frequency, angle, and time spaces, on the basis of the key evolvement phases of the SAR imaging technology. Furthermore, the definition of Multidimensional Space Joint-observation SAR (MSJosSAR) is given on the basis of the demand for the information fusion of MSJosSAR images. Then, the advantage of MSJosSAR is revealed by using the Kronecker product decomposition technology for gaining a better understanding of the target scattering mechanisms. Moreover, the hypothesis and the basic framework of the MSJosSAR signal processing are listed and illustrated. Finally, the number of joint observation spaces in typical SAR configurations is enumerated.

**Key words**: Multidimensional Space Joint-observation SAR (MSJosSAR); Scattering mechanisms; Kronecker product decomposition

## 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像技术是以微波谱段的电磁波作为探测手段，利用成像传感器获取观测对象散射特征和相关信息的信息获取技术。与传统的光学成像相比，SAR 成像不受日照和天气条件的限制，能够全天时、全天候的对目标或场景进行观测，已发展成为资源勘察、环境监测和灾害评估的重要手段，是 21 世纪最具发展潜力的战略高技术领域之一，是国家综合竞争力的具体体现。

一方面，SAR 系统自身持续、迅猛的发展不断推动着 SAR 成像理论的探索和关键技术的研究。最初的 SAR 数据获取方式较为单一，主要工作在单极化、单角度和单波段。随着 SAR 成像技术的发展及其应用需求的推动，数据获取方式日臻多样化，逐步由单极化、单角度和单波段发展到多极化、多频率、多角度和多时相等不同观测方式的组合。从 SAR 成像技术自身的发展而言，在联合观测条件下，被观测对象的散射机理及其在 SAR 图像中的表征呈现出特性上的差异，上述特性直接关系到对观测对象的认知和理解。原有的针对单一观测量或几个观测量简单组合的 SAR 成像理论和方法已经不适于描述观测对象的复杂散射特征，也不利于提高定量遥感精度[1−9]。

另一方面，国家重大应用需求对未来 SAR 成像理论和方法提出了更高的要求。从应用需求的角度来说，现有的 SAR 成像技术也很难解决实际应用中的一系列难题，特别是高精度地形测绘、海洋复杂环境观测以及森林资源与生态质量动态监测等国家重大需求。例如在高精度测绘方面，目前 SAR 成像

2013-05-02 收到，2013-05-22 改回；2013-05-24 网络优先出版
国家自然科学基金(60890070, 60890071)资助课题
*通信作者： 吴一戎 wyr@mail.ie.ac.cn

技术只能实现对地表平均高度的测量和方位-斜距平面成像等。迭掩、阴影和体散射去相干等因素是制约高精度地形测量(包括形变检测)和地表覆盖物制图发展的瓶颈所在。研究结果初步表明，能够获取极化、频率、角度和时相多个空间内联合观测量的 SAR 成像技术，具有解决上述难题的潜力。在海洋复杂环境观测方面，目前单一观测量的信息难以满足对高精度水下地形探测和海冰厚度、类型及冰间水道探测的要求。相关研究初步表明，利用多时相的 SAR 成像数据可提高水下地形的探测精度，利用多极化 SAR 成像数据可提高海冰的分类精度。此外，国家近年来逐步启动了天然林资源保护工程、退耕还林工程、京津风沙源治理工程、“三北”及长江流域等防护林体系建设工程等六大林业重点生态工程。对上述林业重点生态工程的进展和实施效果进行监测和评价，迫切需要提高森林 3 维空间分布信息的遥感提取精度。多波段、多时相、极化和极化干涉 SAR 对于森林垂直结构信息的定量反演具有独特的优势[10−16]。

## 2 SAR 成像技术发展历程

伴随着各种先进技术的出现、定量化应用需求的增加以及科学研究的不断深入，国际上 SAR 成像技术在极化、频率、角度和时相等空间观测能力的发展大致历经了以下几个重要阶段：

第一阶段主要是从距离向压缩到方位向合成孔径，再发展到干涉高程测量。1951 年美国的 Carl Wiley 首先提出频率分析方法改善雷达角分辨率，从而使得对观测区域的方位向合成孔径成像成为可能。1969 年，Rogers 等人提出将雷达干涉技术应用于金星表面观测。1974 年，美国航空航天局(NASA)利用机载 SAR 系统首次对地球地形进行了雷达干涉测量，从而使得微波成像技术开始向干涉高程测量发展。从 1996 年到 2001 年，美国启动“航天飞机雷达地形测量任务”(SRTM)计划，利用“奋进号”航天飞机完成了约占全球 80%陆地面积的测绘，经处理可制成地球表面的数字高程模型[1,3,6,9,16]。

第二阶段重点是在单一观测空间内的延伸。主要包括极化、角度、频率等。波段由微波波段向低波段和太赫兹(THz)扩展；极化由单极化向多极化到全极化的发展，如日本的星载全极化 SAR 系统 ALOS/PALSAR，德国全极化 SAR 系统 TerraSAR-X 和加拿大的 RADARSAT-2，极化 SAR 技术已成为全球环境监测和地表测绘的重要手段之一；观测角度由单站 SAR 成像向双/多基方向发展[17−24]。

第三阶段是对两个观测空间的综合研究，是目前国外的研究热点。在综合极化和角度两个观测空间方面，极化干涉 SAR 已开展了大量的研究工作。最近，又提出了将频率和角度结合的 MIMO-SAR。1997 年，Papathanassiou 等人首先利用 SIR-C/X-SAR 数据研究了频率、极化对干涉相干性的影响，这是极化信息和干涉信息相结合的极化干涉 SAR 的最初起源。极化干涉 SAR 将极化和角度两个空间的信息综合，充分利用了干涉 SAR 对地表散射体高程敏感的特性和极化 SAR 对体散射体的形状、方向和介电特性敏感的特性，具有提高传统干涉测量相干性的能力以及提取体散射体结构信息的潜力，使得 SAR 应用于体散射体结构提取等成为可能。目前，国际上针对于极化干涉研制了不同种类的机载实验平台，主要有德国 DLR E-SAR(P/L/S 三波段全极化)、日本 PiSAR(L/X 双波段全极化)、美国 AIRSAR(P/L/C 三波段全极化)以及法国 RAMSES 系统(P/L/S/C/X/Ku/Ka/W 多波段全极化)等，都具有重复飞行极化干涉测量能力，可实现多频、高空间分辨和干涉测量等多种组合模式的数据获取。近年来，欧、美和加拿大等已经开始星载极化干涉 SAR 系统的初步研究，已开展收发分置星载极化干涉 SAR 系统的可行性论证。星载极化和极化干涉 SAR 系统已成为目前国外研究和研制的重点，但这是建立在他们已经研制了若干部机载极化 SAR 和极化干涉 SAR 系统，并开展大量实验研究的基础之上的[25−47]。从 2003 年起，欧空局隔年组织一次全球范围的 POLinSAR 研讨会，到目前为止一共举行了五届，进一步使得该技术的应用研究获得了广泛关注，利用 E-SAR, AIRSAR, RAMSES 等系统获取的机载极化干涉 SAR 数据，以及 ENVISAT ASAR, ALOS/PALSAR, TerraSAR-X 和 RADARSAT-2 等星载重复飞行极化干涉数据开展大量的理论和方法的研究。

从 20 世纪 70 年代开始，中国科学院电子学研究所开展 SAR 成像技术的研究，并于 1979 年成功研制第一部机载 SAR 原理样机。中航 607 所、中电 14 所和中电 38 所等单位也相继开展了 SAR 系统的研制工作。经过近 30 年的发展，尤其是近 10 年来，我国的 SAR 成像技术得到了迅猛的发展，2 维成像分辨率已由最初的几十米提高到目前的亚米级，从而为目标的检测与识别等应用奠定了坚实的基础。“十五”期间，在国家 863 计划支持下，成功研制了我国第一部机载双天线干涉 SAR 系统。

可以预见，在一定约束条件下，获取极化、频率、角度和时相空间中多个空间的联合观测量，是未来 SAR 成像技术及其应用发展的重要趋势[41]。

## 3　多维度 SAR 的定义和基本内涵

多维度 SAR (Multidimensional Space Joint-observation SAR, MSJosSAR)是在一定约束条件下，以 SAR 的基本观测方式在极化、频率、角度和时相空间中的至少两个空间内，分别获得多个观测量集合的联合观测技术手段。与之相对的是，在单一空间内获取单/多个观测量集合的探测手段是单维度 SAR。多维度 SAR 通过信号与信息综合处理，有可能更准确地区分被观测对象的不同散射机理，进而更准确地获得其几何特征和物理特征。针对特定应用，分别从数据域、信号域和特征域对观测对象进行客观描述。以观测对象与电磁波之间的相互作用规律为基础，发展成像机制优化方法、成像处理技术和信息提取方法，并最终实现对观测对象各类特征的精细刻画和定量反演。

在单色平面波假设下可得任意位置处观测对象的散射场，表示为

$$\boldsymbol{E}(\hat{\boldsymbol{p}},f,\hat{\boldsymbol{k}},t;\boldsymbol{\sigma})=\boldsymbol{\sigma}(\hat{\boldsymbol{p}},f,\hat{\boldsymbol{k}},t,\boldsymbol{r})[e^{i(2\pi f(t-\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\boldsymbol{r}/c))}\cdot\hat{\boldsymbol{p}}] \tag{1}$$

式中 $f$ 为电磁波频率；$t$ 表示传播时刻；$\hat{\boldsymbol{k}}$ 描述了平面波传递方向；与位置 $\boldsymbol{r}$ 的点乘运算代表了波矢量在该位置处的投影量；$\hat{\boldsymbol{p}}$ 可以通过一对单位琼斯矢量 $\hat{\boldsymbol{p}}=\left(1/\sqrt{2}\right)\left[e^{j\delta_{\hat{\boldsymbol{m}}}}\quad e^{j\delta_{\hat{\boldsymbol{m}}_\perp}}\right]^{\mathrm{T}}$ 来表达电磁场在传播过程中的极化状态[18]；$\boldsymbol{\sigma}(\hat{\boldsymbol{p}},f,\hat{\boldsymbol{k}},t,\boldsymbol{r})$ 为 $\boldsymbol{r}$ 处观测对象对入射波的 2×2 复散射系数矩阵，也是 SAR 观测的目标反演量。该项不仅与观测对象自身的特征有关，还与入射波的极化、频率、角度和时相都有关。由式(1)可知，通过改变雷达工作的极化、频率、角度和时相参数，就可以获得对同一个观测对象的多个像。

为了直观地表示多维度 SAR 的观测空间，需要建立多维度参数坐标系。首先，极化空间可以利用庞加莱(Poincaré)球来完全表征[48,49]，如图 1 所示。

庞加莱球可以表征由极化基变换式定义的任意极化矢量[49]：

$$\hat{\boldsymbol{p}}=\boldsymbol{U}_2(\theta)\boldsymbol{U}_2(\tau)\boldsymbol{U}_2(\alpha)\hat{\boldsymbol{m}}=\boldsymbol{U}_{2(\hat{\boldsymbol{m}},\hat{\boldsymbol{m}}_\perp)\to(\hat{\boldsymbol{p}},\hat{\boldsymbol{p}}_\perp)}\hat{\boldsymbol{m}} \tag{2a}$$

$$\hat{\boldsymbol{p}}_\perp=\boldsymbol{U}_2(\theta)\boldsymbol{U}_2(\tau)\boldsymbol{U}_2(\alpha)\hat{\boldsymbol{m}}_\perp=\boldsymbol{U}_{2(\hat{\boldsymbol{m}},\hat{\boldsymbol{m}}_\perp)\to(\hat{\boldsymbol{p}},\hat{\boldsymbol{p}}_\perp)}\hat{\boldsymbol{m}}_\perp \tag{2b}$$

$$\boldsymbol{E}_{(\hat{\boldsymbol{p}},\hat{\boldsymbol{p}}_\perp)}=\boldsymbol{U}_{2(\hat{\boldsymbol{m}},\hat{\boldsymbol{m}}_\perp)\to(\hat{\boldsymbol{p}},\hat{\boldsymbol{p}}_\perp)}\boldsymbol{E}_{(\hat{\boldsymbol{m}},\hat{\boldsymbol{m}}_\perp)} \tag{2c}$$

式中 $\boldsymbol{U}_2$ 为特殊酉变换；式(2a)，式(2b)通过极化方向角$\theta$、极化椭圆率角$\tau$及初始相位角$\alpha$给出了任意极化基的表达式；式(2c)定义了任意两组正交极化基下场强的变换关系。由此可知，全极化合成孔径雷达具备了在有限频点和观测角度内获取观测对象完整的瞬态极化散射特征的能力，即在极化空间内的完备性。正是由于这一完备性，极化 SAR 具有了对观测对象极化散射特征的描述、分类及定量化比较能力。

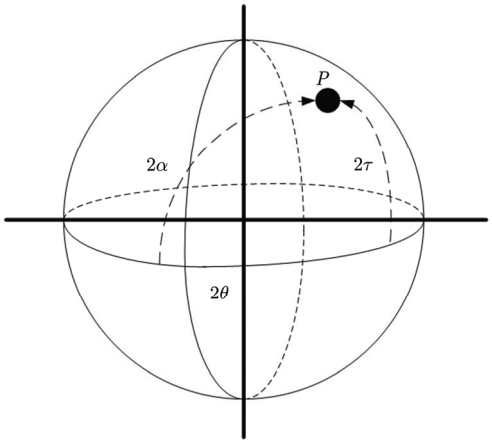


图 1 庞加莱球

Fig. 1　Poincaré sphere

与极化空间不同，在现有技术水平及传感器使用条件下，式(1)中的频率、角度和时相都无法提供和极化空间相比拟的完备集。具体来说，频率的完备集可以描述为一条由从低到高不同频点组成的直线 $f$，反映了观测对象散射特征的频谱响应曲线。而角度的完备集则可以通过观测波矢在目标坐标系的俯仰角$\eta$及方位角$\varphi$来表征，即空间视角$(\hat{\eta},\hat{\varphi})$，反映了观测对象散射特征的视角变化响应曲面。复波数

$$\boldsymbol{k}=\frac{2\pi f}{c}(\hat{\eta},\hat{\varphi}) \tag{3}$$

定义了电磁波传播的频率和方向。与庞加莱球相类似，可以将平面波复波数集合直观地表示为描述 3 维波数域的 $\boldsymbol{k}$ 球[41]，如图 2 所示。

与庞加莱球不同的是，$\boldsymbol{k}$ 球的半径与式(3)中的频率有关。不同半径的 $\boldsymbol{k}$ 球代表了在不同频率上的观测，因此可以认为 $\boldsymbol{k}$ 球为实心球。尽管由频率与

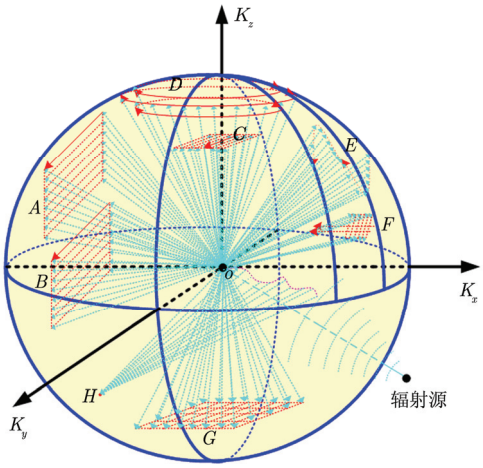


图 2　$\boldsymbol{k}$ 球

Fig. 2　$\boldsymbol{k}$ sphere

角度所构成的综合空间可以通过 $\boldsymbol{k}$ 球来完整地描述，但是在现有技术水平及传感器使用条件下，仅能够实现部分频段和角度下的观测，获取角度与频率空间联合观测量的子集。同理，时相空间可以描述为一条由不同时刻组成的直线 $t$，反映了观测对象散射特征的时间响应曲线，同样在现有观测条件下仅能获取时相空间内观测量的子集。由于多维度空间形式不便表示和理解，可以将其空间坐标表示为：将每个时间轴上的时刻作为圆心，构成庞加莱球。再以每个庞加莱球表面上的每一点作为圆心构成 $\boldsymbol{k}$ 球，如图 3 所示。其中代表极化空间的庞加莱球因具有完备性而成为关联其它空间的纽带。

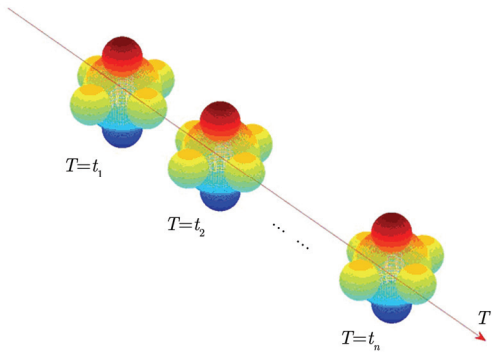


图 3 多维度球簇

Fig. 3 Multidimensional space joint-observation sphere set

通过在极化、频率、角度和时相 4 个空间对发射/接收电磁波的描述，并结合现有合成孔径雷达的观测能力、使用模式及获取信息的完备性分析，可以将多维度合成孔径雷达定性地描述为以极化空间为核心，能够获取可以反映观测对象散射特征随频率、角度和时相变化的离散多维度观测量子集，结合多维度信号处理方法来拟合目标在极化、频率、角度和时相 4 个空间坐标上的完整散射特征像，用于直接定量化反演观测对象的生物物理参数。

## 4 多维度 SAR 信号模型

有关文献指出[43,47]，极化层析 SAR 信号可以在满足一定条件的前提下表达为观测对象散射特征之和的形式。本文将其拓展到多维度 SAR 观测空间，即若观测对象的散射特征响应随极化、频率、角度和时相的变化满足：

H1：每种散射机制相互统计独立；

H2：每种散射机制的极化特征稳定；

H3：每种散射机制在有限带宽内的频率响应特征稳定；

H4：每种散射机制在有限角度内的角度响应特征稳定；

H5：每种散射机制在有限时间内的时相响应特征稳定。

则有，观测量的复相关的期望是多种独立散射机制下的克罗内克积之和[50]。如下式所示：

$$\left\langle \boldsymbol{E}(\hat{\boldsymbol{p}}_{i1},f_{i2},\hat{\boldsymbol{a}}_{i3},t_{i4})\boldsymbol{E}^{*}(\hat{\boldsymbol{p}}_{j1},f_{j2},\hat{\boldsymbol{a}}_{j3},t_{j4})\right\rangle = \sum_{k=1}^{K}\alpha_k(\hat{\boldsymbol{p}}_{i1},\hat{\boldsymbol{p}}_{j1})\cdot\beta_k(f_{i2},f_{j2})\cdot\gamma_k(\hat{\boldsymbol{a}}_{i3},\hat{\boldsymbol{a}}_{j3})\cdot\delta_k(t_{i4},t_{j4}) \tag{4}$$

其中

$$\alpha_k\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{i1},\hat{\boldsymbol{p}}_{j1}\right)=\left\langle E\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{i1},f_{i2},\hat{\boldsymbol{a}}_{i3},t_{i4}\right)E^{*}\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{j1},f_{j2},\hat{\boldsymbol{a}}_{j3},t_{j4}\right)\right\rangle\Big|_{f,\hat{\boldsymbol{a}},t} \tag{5}$$

$$\beta_k\left(f_{i2},f_{j2}\right)=\left\langle E\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{i1},f_{i2},\hat{\boldsymbol{a}}_{i3},t_{i4}\right)E^{*}\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{j1},f_{j2},\hat{\boldsymbol{a}}_{j3},t_{j4}\right)\right\rangle\Big|_{\hat{\boldsymbol{p}},\hat{\boldsymbol{a}},t} \tag{6}$$

$$\gamma_k\left(\hat{\boldsymbol{a}}_{i3},\hat{\boldsymbol{a}}_{j3}\right)=\left\langle E\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{i1},f_{i2},\hat{\boldsymbol{a}}_{i3},t_{i4}\right)E^{*}\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{j1},f_{j2},\hat{\boldsymbol{a}}_{j3},t_{j4}\right)\right\rangle\Big|_{\hat{\boldsymbol{p}},f,t} \tag{7}$$

$$\delta_k(t_{i4},t_{j4})=\left\langle E\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{i1},f_{i2},\hat{\boldsymbol{a}}_{i3},t_{i4}\right)E^{*}\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{j1},f_{j2},\hat{\boldsymbol{a}}_{j3},t_{j4}\right)\right\rangle\Big|_{\hat{\boldsymbol{p}},f,\hat{\boldsymbol{a}}} \tag{8}$$

该结果可以利用克罗内克积表示成矩阵 $\boldsymbol{W}$ 的形式，即

$$\left\langle E\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{i1},f_{i2},\hat{\boldsymbol{a}}_{i3},t_{i4}\right)E^{*}\left(\hat{\boldsymbol{p}}_{j1},f_{j2},\hat{\boldsymbol{a}}_{j3},t_{j4}\right)\right\rangle = \sum_{k=1}^{K}\alpha_k(\hat{\boldsymbol{p}}_{i1},\hat{\boldsymbol{p}}_{j1})\cdot\beta_k(f_{i2},f_{j2})\cdot\gamma_k(\hat{\boldsymbol{a}}_{i3},\hat{\boldsymbol{a}}_{j3})\cdot\delta_k(t_{i4},t_{j4})$$

$$\Leftrightarrow \boldsymbol{W}=\left\langle \boldsymbol{E}\boldsymbol{E}^{*}\right\rangle=\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{P}_k\otimes\boldsymbol{F}_k\otimes\boldsymbol{A}_k\otimes\boldsymbol{T}_k \tag{9}$$

上式中 $\otimes$ 表示矩阵克罗内克积运算，矩阵 $\boldsymbol{P}_k$, $\boldsymbol{F}_k$, $\boldsymbol{A}_k$, $\boldsymbol{T}_k$ 分别是关于极化，频率，角度和时间的协方差矩阵，该公式涵盖了从在单一时刻下获取的单极化、单频率和单角度的观测对象的复散射系数到全极化、干涉、极化干涉、差分极化干涉以及极化层析成像在内的完整的多维度 SAR 观测量集合。以 3 个典型模型来说明该观测量集合：

(1) 极化复散射系数模型　例如 F-D 极化目标分解模型[51]可以将式(9)退化为单频，单视角，单一时刻观测下的极化 SAR 情况，

$$\boldsymbol{W}_{\text{F-D}}=\boldsymbol{P}_{\text{volume}}+\boldsymbol{P}_{\text{surface}}+\boldsymbol{P}_{\text{double}} \tag{10}$$

其中 $\boldsymbol{P}_{\text{volume}},\boldsymbol{P}_{\text{surface}},\boldsymbol{P}_{\text{double}}$ 分别对应体散射、表面散射和 2 次散射的极化协方差矩阵。

(2) 极化层析(Tomo)成像模型　可以将式(9)退化为单频，多视角，单一时刻观测下的极化 SAR 情况[43,47]，

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{Tomo}}=\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{P}_k\otimes\boldsymbol{A}_k \tag{11}$$

其中 $\boldsymbol{P}_k,\boldsymbol{A}_k$ 分别是关于极化，角度的协方差矩阵。

(3) 极化相干散射模型　特例为 RVoG 极化干涉模型[17−21]

$$\boldsymbol{W}_{\mathrm{RVoG}}=\boldsymbol{P}_{\mathrm{volume}}\otimes\boldsymbol{A}_{\mathrm{volume}}+\boldsymbol{P}_{\mathrm{surface}}\otimes\boldsymbol{A}_{\mathrm{surface}} \tag{12}$$

其中 $\boldsymbol{P}_{\mathrm{volume}},\boldsymbol{A}_{\mathrm{volume}},\boldsymbol{P}_{\mathrm{surface}},\boldsymbol{A}_{\mathrm{surface}}$ 分别是关于体散射和表面散射的极化，角度的协方差矩阵。

多维度 SAR 中的维度可以定义为由极化、频率、角度和时相空间所张成雷达观测空间，用 $\{\cdot,\cdot,\cdot,\cdot\}$ 表示。由不同雷达工作方式所获取的观测量构成雷达观测空间中的一个或多个样本[52]。例如，以单极化、单频、单视角在单一时刻获取的 SAR 观测量对应于空间中的一个样本，获取样本数是 1；多维度 SAR 通过 $i_1$ 个极化、$i_2$ 个频、$i_3$ 个视角、$i_4$ 个时相的观测量得到观测空间的 $\prod_{k=1}^{4} i_k$ 个样本。需要注意的是，判断是否属于多维度 SAR 观测的标准并不仅依据获取样本数量，还需要考虑是否在多个空间内分别获取了多个样本。例如表 1 中的差分干涉 SAR 虽然可以在时相空间内获取 $N\geq 1$ 个样本，但由于在其它 3 个空间内的样本数都是 1，因此也在单维度 SAR 范畴之内。与之相对，极化干涉 SAR 在极化空间内的样本数是 4，同时在角度空间内的样本数是 2，因此属于多维度 SAR。表 1 列出了部分常见的 SAR 工作方式，表中有底色的工作方式都属于多维度 SAR 观测。由此，将多维度数定义为包含多样本的空间数量。

## 5　总结与展望

本文总结了合成孔径雷达(SAR)成像技术的发展历程，论述了多维度 SAR 成像的必要性及发展趋

**表 1　SAR 工作方式的多维度表述**

**Tab. 1　The multidimensional space joint-observation of typical SAR configurations**

| 工作方式 | 空间样本 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 极化 | 频率 | 角度 | 时相 | 观测空间维度 | 多维度数 | 散射矢量 | 新增反演量(复) |
| SAR(基准) | 1 | 1 | 1 | 1 | {1,1,1,1} | 0 | $\boldsymbol{K}_1$ | 包含相位的复$\sigma_0$图 |
| 干涉 | 1 | 1 | 2 | 1 | {1,1,2,1} | 1 | $\boldsymbol{K}_2$ | DXM(垂直分布散射中心的平均高程位置，在这里包含了DSM, DEM 和 DTM) |
| 极化 | 4 | 1 | 1 | 1 | {4,1,1,1} | 1 | $\boldsymbol{K}_4$ | 3 类基本散射 |
| 极化干涉 | 4 | 1 | 2 | 1 | {4,1,2,1} | 2 | $\boldsymbol{K}_8$ | 3 类基本散射的多层分布 |
| 差分干涉 SAR | 1 | 1 | 1 | $N$ | {1,1,1,$N$} | 1 | $N$ 个 $\boldsymbol{K}_1$ | 包含相位变化的复 $\sigma_0$ 变化图 |
| 多航过双天线干涉 | 1 | 1 | 2 | $N$ | {1,1,2,$N$} | 2 | $N$ 个 $\boldsymbol{K}_2$ | DXM(垂直分布散射中心的分层、平均高程位置) |
| 多航过极化 | 4 | 1 | 1 | $N$ | {4,1,1,$N$} | 2 | $N$ 个 $\boldsymbol{K}_4$ | $\sigma_0$ 变化图+基本散射变化图 |
| 多航过双天线极化干涉 | 4 | 1 | 2 | $N$ | {4,1,2,$N$} | 3 | $N$ 个 $\boldsymbol{K}_8$ | 3 类基本散射的精细垂直结构(生物量，碳储量) |
| 多波段 SAR | 1 | $M$ | 1 | 1 | {1,$M$,1,1} | 1 | $M$ 个 $\boldsymbol{K}_1$ | $M$ 个 $\sigma_0$ 图 |
| 多波段干涉 | 1 | $M$ | 2 | 1 | {1,$M$,2,1} | 2 | $M$ 个 $\boldsymbol{K}_2$ | $M$ 个 DXM(垂直分布散射中心的平均高程位置) |
| 多波段极化 | 4 | $M$ | 1 | 1 | {4,$M$,1,1} | 2 | $M$ 个 $\boldsymbol{K}_4$ | $M$ 个 3 类基本散射 |
| 多波段极化干涉 | 4 | $M$ | 2 | 1 | {4,$M$,2,1} | 3 | $M$ 个 $\boldsymbol{K}_8$ | $M$ 个 3 类基本散射的多层分布 |
| 单航过多波段多角度极化 | 4 | $M$ | $L$ | 1 | {4,$M$,$L$,1} | 3 | $ML$ 个 $\boldsymbol{K}_4$ | $M$ 个 3 类基本散射的精细垂直结构 |
| 多航过多波段多角度极化 | 4 | $M$ | $L$ | $N$ | {4,$M$,$L$,$N$} | 4 | $MLN$ 个 $\boldsymbol{K}_4$ | 待研究 |

势。在此基础上，基于信息综合利用的需求解释了多维度 SAR 成像的基本内涵；建立了多维度 SAR 成像的定义；提出了基于观测对象特征分解的描述方法、多维度信号处理框架和基本假设条件；建立了 SAR 工作方式的多维度表述及多维度数的定义方法。

在多维度 SAR 应用的第一个层面上，通过融合单维度复散射系数图便具有了一定的观测对象散射特征反演能力，不存在维度间的相干获取限制；在多维度 SAR 应用的第二个层面上，通过层析或 3 维成像等信号处理方法在维度间直接形成多维度复散射系数图像，此类多维度 SAR 应用对相干获取有一定要求，反演精度中等；在多维度 SAR 应用的第三个层面上，通过提取和分离相干散射形成的相位信息来直接反演观测对象的生物物理参数，这是在多维度 SAR 应用中对相干获取的要求最高但反演也最精确的类型。在未来的多维度散射机理研究中，应根据观测对象的散射类型特征以及待反演量来建立场的具体表达形式，利用极化空间维度的完备性来作为分析验证工具，利用张量等数学工具来解决多维度遥感定量化所面临的获取机制优化、信号处理及参数反演等问题。

**致谢** 本文的工作是在国家自然科学基金重大项目“多维度微波成像基础理论与关键技术”的资助下完成的。重大项目课题一“多维度微波成像散射机理与成像机制”的核心成员洪文研究员、王彦平研究员、王卫延研究员、李洋、尹嫱、谭维贤、赵曜博士等对本文有重要贡献。在项目研究和概念完善过程中得到了基金委信息学部及项目专家组的指导以及项目承研单位中国科学院电子学研究所、西安电子科技大学、北京理工大学、中国林业科学研究院、武汉大学和国家海洋局海洋一所等参研团队的宝贵建议，在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

[1] Sherwin C W, Ruina J P, and Rawclisse R D. Some early developments in synthetic aperture radar systems[J]. *IRE Transactions on Military Electronics*, 1962, 6(2): 111–115.

[2] Brown W M. Synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1967, 3(2): 217–229.

[3] Wiley C A. Synthetic aperture radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1985, 21(3): 440–443.

[4] Currie A and Brown M A. Wide-swath SAR[J]. *IEE Proceedings F Radar Sonar and Navigation*, 1992, 139(2): 122–135.

[5] Moreira J, Schwabisch M, and Fornaro G. X-SAR interferometry: first results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 950–956.

[6] Gabriel A K and Goldstein R M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(5): 857–872.

[7] Goldstein R M, Zebker H A, and Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimension phase unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(5): 713–720.

[8] Hoen E W and Zebker H A. Penetration depths in inferred from interferometric volume decorrelation observed over the Greenland Ice Sheet[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(6): 2571–2583.

[9] Bamler R and Eineder M. ScanSAR processing using standard high precision SAR algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(1): 212–218.

[10] Dubois-Fernandez P, Cantalloube H, and Dupuis X. Clutter statistical analysis for high resolution SAR data[C]. Proceedings of IGARSS, Anchorage, 2004, 3: 1781–1783.

[11] Cantalloube H and Dubois-Fernandez P. Airborne X-band SAR imaging with 10 cm resolution: technical challenge and preliminary results[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(2): 163–176.

[12] Prati C and Rocca F. Improving slant-range resolution with multiple SAR surveys[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 1993, 29(1): 135–143.

[13] Curlander C and McDonough R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing[M]. New York: Wiley, 1991.

[14] Langenberg K J, Brandfaß M, Fellinger P, *et al.*. Radar Target Imaging[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, Eds. H. Uberall and W. M. Boerner, 1994: 113–151.

[15] Huynen J R. Phenomenological theory of radar targets[D]. [Ph.D. dissertation], Delft: Delft University of Technology, The Nether-lands, 1970.

[16] Boener W M. Need for developing multi-band single and multiple pass polInSAR platforms in air and space[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, July 21–25, 2003: 422–424.

[17] Cloude S R. Concept of polarisation entropy in optical scattering[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1599–1610.

[18] Cloude S R and Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 498–518.

[19] Cloude S R and Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(1): 68–78.

[20] Cloude S R and Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and*

*Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1551–1565.

[21] Papathanassiou K P and Cloude S R. Single baseline polarimetric SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2352–2363.

[22] Knaell K K and P Cardillo G. Radar tomography for the generation of three-dimensional images[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1995, 142(2): 54–60.

[23] Cafforio C, Prati C, and Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(2): 194–207.

[24] Jakowatz C V Jr, Wahl D E, Eichel P H, *et al.*. Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach[M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[25] Ishimaru A, Chan T-K, and Kuga Y. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1524–1530.

[26] She Zhishun, Gray D A, Bogner R E, *et al.*. Three-demensional SAR Imaging via multiple pass processing[C]. Proceedings of IGARSS, Hamburg, Germany, 1999.

[27] Reigber A and Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142–2152.

[28] Fornaro G, Lombardini F, and Serafino F. Three-dimensional multipass SAR focusing: experiments with long-term spaceborne data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 702–714.

[29] Massonnet D, *et al.*. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364: 138–142.

[30] Ferreti A, Prati C, and Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8–20.

[31] Noferini L, Pieraccini M, Mecatti D, *et al.*. Permanent scatterers analysis for atmospheric correction in ground-based SAR inter- ferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(7): 1459–1471.

[32] Colesanti C, Ferreti A, Novali F, *et al.*. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(7): 1685–1701.

[33] Lombardini F. Differential tomography: a new framework for SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(1): 37–44.

[34] Singhroy V and Saint-Jean R. Geological uses of multi-incidence RADARSAT images[C]. Proceedings of IGARSS, Seattle, WA, USA, 1998.

[35] Raney R K, Runge H, Bamler R, *et al.*. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786–799.

[36] Moreira A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123–1136.

[37] Mittermayer J, Moreira A, and Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198–2214.

[38] Bamler R and Eineder M. Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 151–155.

[39] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Artech House, Inc., 2005.

[40] Reigber A, Alivizatos E, Potsis A, *et al.*. Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 301–310.

[41] Wu Yirong and Hong Wen. From Synthetic Aperture Radar Imaging to Multi-Parameter Multi-Dimensional Microwave Imaging[C]. Proceedings of APSAR, Huangshan, China, November 2007.

[42] Krieger G, Moreira A, Fiedler H, *et al.*. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3317–3340.

[43] Tebaldini S and Rocca F. Polarimetric options for SAR tomography of forested areas[C]. Proceedings of the Fourth International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, Netherlands, 2009: 45–48.

[44] Lin Yun, Hong Wen, Tan Weixian, *et al.*. Interferometric circular SAR method for three-dimensional imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1026–1030.

[45] Zhou Yongsheng, Hong Wen, Wang Yanping, *et al.*. Maximal effective baseline for polarimetric interferometric SAR forest height estimation[J]. *SCIENCE CHINA*: *Information Sciences*, 2012, 55(4): 867–876.

[46] Peng X, Tan W, Wang Y, *et al.*. Convolution back-projection imaging algorithm for downward-looking sparse linear array three dimensional synthetic aperture radar[J]. *Progress In*

*Electromagnetics Research*, 2012, 129: 287–313.

[47] Tebaldini S and Rocca F. Multibaselinepolarimetric SAR tomography of a borealforestat P- and L-bands[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(1): 232–246.

[48] Ardeshir G, Raj Mittra, and Philip J M. Electromagnetic Wave Interactions[M]. World Scientific Pub Co Inc., 1997: 169–172.

[49] Boerner W M, Wei-ling Y, Xi A-Q, *et al.*. On the basic principles of radar polarimetry: the target characteristic polarization state theory of Kennaugh, Huynen's polarization fork concept, and its extension to the partially polarized case[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1991, 79(10): 1538–1550.

[50] Michiel Hazewinkel. Tensor Product[M]. Encyclopedia of Mathematics, German: Springer, 2001.

[51] Freeman A and Durden S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 963–973.

[52] Rudin Walter. Real and Complex Analysis[M]. New York: McGraw-Hill Science Education, 1986.

## 作 者 简 介

吴一戎(1963–)，男，中国科学院院士，研究员，博士生导师，中国科学院电子学研究所所长，主要研究方向为高分辨率和干涉 SAR 系统技术、遥感卫星地面处理与应用系统技术等。