

## 大型稀疏阵列天基雷达系统分析

潘 洁<sup>\*①②</sup> 李道京<sup>①</sup> 周建卫<sup>①②</sup> 卢晓春<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

<sup>③</sup>(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

**摘 要:** 天基雷达可以在全球范围内实现运动目标探测和对地高分辨率成像。该文研究了天基雷达系统问题, 基于大型稀疏阵列天线, 论述了天基雷达的技术体制和关键技术, 设计了基于稀疏阵列的 MEO 轨道 X 波段天基雷达系统参数并分析了其系统性能, 为天基雷达的技术实现提供了一种新的途径。

**关键词:** 天基雷达; 稀疏阵列; 目标探测; SAR 成像; 雷达系统

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)12-3269-06

DOI: 10.11999/JEIT160672

## Space-based Radar System Analysis Based on Large Scale Sparse Array

PAN Jie<sup>\*①②</sup> LI Daojing<sup>①</sup> ZHOU Jianwei<sup>①②</sup> LU Xiaochun<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>③</sup>(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** Space-Based Radar (SBR) can realize moving target detection and the high resolution imaging on a global scale. Based on large scale sparse array antenna, this paper discusses the space-based radar technology system and key technology. The system parameters are designed and its performance is analyzed for an X band MEO space-based radar. The large scale sparse array antenna provides a new selection for space-based radar.

**Key words:** Space-Based Radar(SBR); Sparse array; Target detection; SAR imaging; Radar system

### 1 引言

天基雷达 (Space-Based Radar, SBR) 以卫星作为观测平台, 可实现对地高分辨率成像和对空间、空中、地面、海面运动目标探测, 能连续对陆海空天目标进行全方位的侦察监视, 实现天基预警。天基雷达作为获取信息的核心装备, 在国家战略防御预警系统中具有重要地位, 现已成为当今世界各航天军事大国的研究重点<sup>[1]</sup>。

卫星轨道通常按照高度分为低轨(LEO)、中轨(MEO)、同步卫星轨道(GEO)。LEO 轨道高度约为 700~1200 km, 全球覆盖约需 20~30 颗卫星; MEO 轨道高度约为 8000~13000 km, 全球覆盖约需 15~25 颗卫星; GEO 轨道高度为 35800 km, 全球覆盖约需 3~4 颗卫星。较高的卫星轨道, 可以提高覆盖范围、减少观测卫星数目、增加驻留时间用于运动目标探测, 对天基雷达预警具有重要的意义。

由于探测距离远, 天基雷达需要大功率孔径积、

轻量化、可展开而且收拢体积小的有源相控阵天线<sup>[2]</sup>。美国空军实验室支持研制的 X 波段 300 m × 3 m 有源透镜天线, 发射前可收拢, 发射后采用充气硬化展开, 但其全阵的阵面控制精度需要有特殊措施保证<sup>[3]</sup>。

考虑到星上供电能力有限, 天基雷达必须采用大尺寸天线。当轨道高度大于 10000 km 时, 用于运动目标探测的天基雷达, 其功率孔径积应大于 65 dBwm<sup>2</sup> [1,4]。当天线发射平均功率需控制在 20~30 kw 量级, 其天线面积应在 250 m<sup>2</sup> 左右。在采用大面积天线保证功率孔径积的条件下, 进一步增大天线尺寸提高其空间分辨率有助于对运动目标探测定位精度的提升。这种大型天线采用传统技术很难工程实现。

稀疏阵列天线及其孔径综合技术在射电天文望远镜、地基/星载/机载成像辐射计和地基对空观测雷达<sup>[5-7]</sup>中已获得了广泛的应用。近年来, 中国科学院电子学研究所积极开展了稀疏微波成像理论和方法的研究<sup>[8]</sup>, 深入研究了稀疏阵列天线雷达技术, 已取得了一定的研究成果<sup>[9]</sup>。目前稀疏阵列天线应用

于机载雷达<sup>[10]</sup>和艇载雷达<sup>[11,12]</sup>的研究工作已经展开, 本文将相关概念引入天基雷达, 论述了基于大型稀疏阵列的天基雷达的技术体制和关键技术, 设计了基于稀疏阵列的MEO轨道X波段天基雷达系统参数并分析了其系统性能。

## 2 技术体制和工作原理

(1)概念: 基于大型稀疏阵列的天基雷达是指利用稀疏阵列天线孔径综合技术, 通过空-时-频信号处理, 以较高的空间分辨率和较少的设备体积重量实现运动目标探测和对地成像的雷达系统。主要由大型稀疏阵列天线和中央电子设备两大部分组成, 其中稀疏阵列天线由多个可2维电扫描的有源相控子阵和天线展开机构组成。

(2)体制: 稀疏阵列天基雷达是各子阵采用正交信号实现宽波束发射, 工作在宽发窄收方式下的多发多收体制雷达系统。其全阵高空间分辨率波束形成中的孔径综合和窄波束接收, 可理解是基于子阵级接收DBF进行处理。

(3)稀疏阵列天线孔径综合原理: 利用在空间优化稀疏布局的多发多收结构天线系统, 可获得更小间隔的空间采样点并产生新的天线相位中心, 通过在空间重排处理, 可使相位中心的数量和分布情况与满阵天线相同, 在获取全阵高空间分辨率天线波束的同时, 避免产生栅瓣和较高的旁瓣。

(4)大型阵列形变的测量和天线波束形成方法:

从原理上讲, 只要精确测量和估计阵列形变误差并实施补偿, 就有可能形成理想的天线方向图。由于阵列天线方向图形成和合成孔径雷达成像在本质上是一致的, 合成孔径雷达的成像可理解为利用不同时刻的空间采样实现了大型阵列的瞬时空间采样。在此基础上, 传统的天线波束形成问题也可转化为雷达成像处理问题, 故合成孔径雷达成像处理中的运动补偿方法也可以用于大型阵列形变误差的补偿。

(5)特点: 采用稀疏阵列天线, 在同样的发射功率孔径积条件下, 不仅可以大幅度提高有源阵天线的空间分辨率, 而且便于发射前收拢和星上展开。

## 3 关键技术和解决途径

### 3.1 大型稀疏阵列天线设计

主要内容包括大型天线阵列优化布局技术、高效轻量有源相控子阵技术、接收和发射DBF技术、稀疏阵列天线收拢和展开机构技术等。

随着技术的发展, 目前高效轻量有源相控阵天线(AESA)技术已有长足的发展。AESA的关键部件T/R组件, 初期是砖块Brick结构, 体积大而重,

很难满足 $\lambda/2$ 的安装尺寸要求, 生产需要许多手工参与, 成本高, 不易小型化设计。随着MMIC, LTCC, HTCC, SOC等的技术进步, 美国、德国等西方先进国家已经设计制造出带辐射阵元立体集成的瓦片式Tile的T/R, 并已成功装备到F-15战斗机上使用。德国EADS公司已提出星载TerraSAR-X的砖块Brick式T/R到瓦片Tile式T/R的过渡计划。

2006年, 国外在X波段由多层LTCC+HTCC的带辐射元的立体集成T/R组件尺寸为 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ , 重量小于4g, 输出功率4W, 噪声系数NF为3.5dB。

由于瓦片式T/R组件, 薄而轻, 易小型化设计, 便于星上使用。瓦片式T/R组件可以大大减少生产中的手工参与, 便于自动化生产和各工序中的检测, 有利于降低成本, 改善和提高可靠性。

基于小型芯片T/R组件和平面集成技术, 目前国外研制的X波段轻质低功率密度有源相控阵天线, 已用于平流层飞艇的验证试验<sup>[13]</sup>, 其重量密度达到 $1.8\text{ kg/m}^2$ , 在接收状态下功耗为 $4.7\text{ W/m}^2$ 。设计并选择低峰值功率芯片T/R组件有利于天基雷达天线的小型化和散热, 是目前的发展趋势<sup>[14]</sup>。

本文大型稀疏阵列天线, 子阵拟设计成刚性结构, 全阵拟工作在非刚性状态下, 其收拢和展开方式可和卫星太阳翼类似。

### 3.2 多子阵相位中心高精度测量和阵列误差补偿

主要内容包括基于分布式位置和姿态测量系统(POS)多子阵相位中心高精度测量技术、基于回波信号的阵列误差估计技术、大型阵列误差高精度补偿技术等。

本文大型天线全阵拟工作在非刚性状态下, 多子阵相位中心高精度测量和阵列误差补偿就成为一项关键技术, 拟采用安装在各子阵上的分布式POS形成多节点测量系统, 完成阵列形变误差测量并引入SAR成像处理中的运动补偿方法实施误差补偿, 同时考虑使用雷达成像常用的自聚焦技术实施阵列误差估计和补偿。

阵列形变误差测量精度的要求约为 $1/16$ 个波长, 在C和X波段对应的相对空间位置测量精度分别约为3.0mm和1.5mm。文献[15]分析了分布式POS的测量精度和用于阵列形变误差测量的可行性, 文献[12]分析了艇载阵列形变误差对成像的影响并实施了阵列形变误差补偿。

### 3.3 运动目标探测和对地高分辨率成像

主要内容包括低信噪比运动目标探测技术、高速运动目标探测技术、地面杂波抑制技术、多模式对地高分辨率成像技术等。

远距离观测和对低 RCS 运动目标探测,要求天基雷达具有对低信噪比微弱信号探测能力。雷达对远距离目标信号可采用长时间相干积累,对近距离目标信号可采用短时间相干积累,并自动实现一定的灵敏度时间控制(STC)功能。通过设置不同的波驻时间,雷达可在作用距离、波束扫描范围和数据率等参数间进行折中选择。采用多频信号和双频共轭处理解除回波信号的多普勒模糊,利用雷达成像处理方法完成高速目标大范围距离徙动校正,解决低信噪比高速运动目标探测问题<sup>[16]</sup>。为减少波驻时间,可使用稀疏阵列中的密集相邻子阵做发射 DBF,减少瞬时波束覆盖范围,提高探测距离。

由于轨道较高,天基雷达的探测对象可包括陆海空天运动目标,应同时考虑对空间目标的成像问题,故在系统设计上对运动目标探测,应考虑设置远距离窄带探测和中距离宽带高分辨率成像模式。

关于对地高分辨率 SAR 成像模式,由于本文天基雷达天线主要工作在子阵宽波束发射,全阵接收 DBF 处理方式下,客观上为多模式对地成像提供了有利条件。

### 3.4 天基信号高速采集和高时效处理技术

主要内容包括多通道信号高速采集技术、稀疏阵列天线孔径综合和接收 DBF 处理技术、高时效信号处理技术等。

由于天线子阵数量和通道数较多,数据量较大,为保证信号质量和通道一致性,信号采集拟使用中频采样,海量信号存储拟使用高密度固态硬盘,信号采集设备并入天线子阵设备中。考虑到天基雷达稀疏阵列天线孔径综合、接收 DBF 处理和对运动目标探测的实际应用需求,天上应有足够的实时和高时效信号处理能力,相关的信号处理硬件结构可采用 FPGA+DSP 的方式实现。

## 4 系统参数设计

### 4.1 波段

波段是雷达的重要参数,使用较短波长可使雷达的空间分辨率和目标探测定位精度较高。使用较长波长(如 S 波段)可使雷达 T/R 组件的效率较高,由于波长较长,也可降低对多子阵相位中心测量和阵列误差补偿的精度要求。目前天基雷达具有明显的向高频段发展的趋势,且在高频段高密度小功率芯片 T/R 组件更容易工程实现,本文雷达系统参数分析主要围绕 X 波段(中心频率 10 GHz)展开。

### 4.2 稀疏阵列

本文 X 波段大型稀疏阵列由 20 个有源相控子阵组成,形成一个长为 238 m 的稀疏线阵。稀疏线阵在交轨方向展开,在获得交轨向高空间分辨率的同时,可考虑利用天基雷达和运动目标存在的相对运动,根据 SAR/ISAR 成像原理提高顺轨方向的空间分辨率和对运动目标的探测定位精度。

本文稀疏阵选为主动冗余线阵,采用模拟退火算法得到的稀疏线阵布阵方式<sup>[5,9]</sup>为: [1 2 4 5 6 9 15 21 27 33 36 42 48 54 60 63 64 65 67 68],图 1 为其孔径综合的结果。

阵列可获得的等效相位中心信号数量为 400,第 1 次换为满阵的孔径综合使用的相位中心信号数量为 135,第 2 次近似换为满阵的孔径综合使用的相位中心信号数量为 127,可以近似得到两次满阵孔径综合的结果<sup>[5]</sup>。图 1 横坐标和纵坐标表示阵列位置,图中第 2 条横虚线表示第 1 次孔径综合处理结果,第 1 条横虚线表示第 2 次孔径综合处理结果。稀疏阵列天线的参数如表 1 所示。

对本文子阵 T/R 规模和功率分析如下:

子阵尺寸为 3.5 m×3.5 m,子阵波束扫描范围为±25°。阵元间距为 0.7 倍波长,约 2.1 cm。T/R

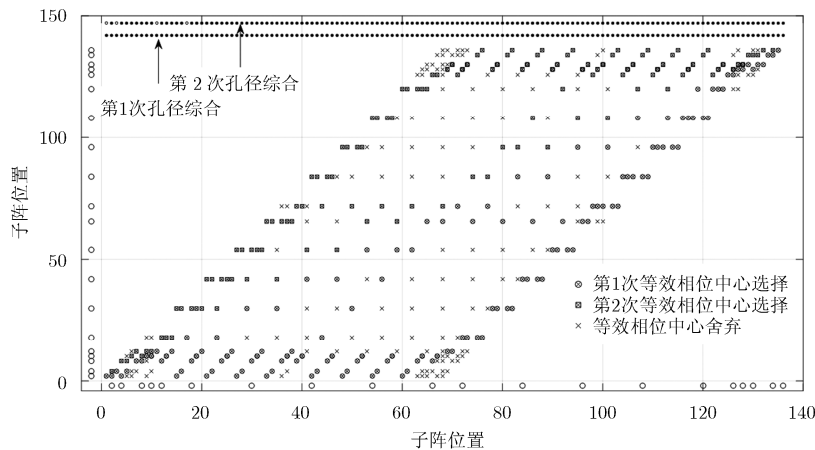


图 1 稀疏线阵孔径综合结果

表 1 稀疏阵列天线的参数

子阵参数	数值	全阵参数	数值
信号波长(m)	0.03	波束展宽因子	1.2~1.4
子阵尺寸(m <sup>2</sup> )	3.5×3.5	全阵尺寸(m <sup>2</sup> )	238×3.50
子阵波束宽度(°)	0.6×0.6	全阵波束宽度(°)	0.01×0.60
波束 2 维扫描范围(°)	±25	全阵面积(m <sup>2</sup> )	245
子阵发射平均功率(kW)	1	全阵发射平均功率(kW)	20
子阵数量(个)	20	功率孔径积(dBWm <sup>2</sup> )	66.9

组件的数量为  $160 \times 160 = 25600$  个。若每个 T/R 峰值功率为 0.3 W，占空比为 15%，子阵平均功率为 1152 W。

4.3 信号波形

为实现多发多收，本文天基雷达需采用正交信号波形，拟使用频分正交信号和码分正交信号，当距离分辨率为 1 m 时，其总的信号带宽应优于 200 MHz。

在对地 SAR 成像模式时，需对稀疏阵做孔径综合，使综合后的相位中心数量和满阵天线相同，主要使用频分正交信号。

在运动目标探测模式时，使用码分正交信号时，通过瞬时孔径综合将稀疏阵换成满阵利用 STAP 实现运动目标探测；使用频分正交信号时，由于运动目标信号具有稀疏特性，可将压缩感知(CS)理论引入稀疏阵列信号处理过程，实施运动目标探测和图像重构<sup>[17]</sup>，因此频分正交信号将是本文天基雷达的首选信号。

图 2 为码分信号和频分信号与子阵的收发关系示意图。

5 系统性能分析

5.1 信噪比和作用距离

本文信噪比分析引入孔径综合处理，主要比对了密集阵窄发窄收、密集阵宽发窄收和稀疏阵宽发

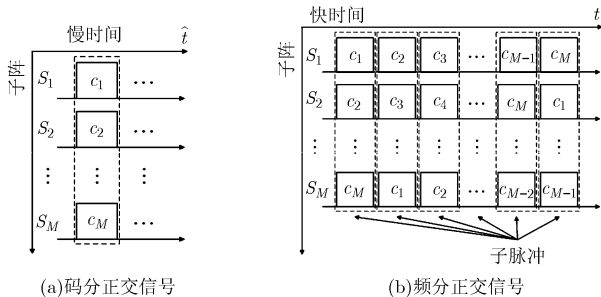


图 2 正交信号和子阵的收发关系示意图

窄收 3 种情况。由于运动目标探测模式所需的功率孔径积远高于对地 SAR 成像模式，本文的信噪比分析主要针对多目标搜索模式进行。雷达系统参数如表 2 所示。

表 2 雷达系统参数

参数	数值	参数	数值
噪声系数 $F_n$ (dB)	3	轨道高度(km)	10000
噪声温度 $T_s$ (K)	290	目标 RCS $\sigma$ (m <sup>2</sup> )	3
波驻时间 $t_{ot}$ (s)	5	地物散射系数 $\sigma_0$ (dB)	-15
系统损耗 $L$ (dB)	7	子阵面积 $A$ (m <sup>2</sup> )	3.5×3.5
最大作用距离 $R$ (km)	12000	天线效率 $\eta$ (%)	50
SAR 斜距分辨率 $\delta_r$ (m)	1	卫星速度 $v_s$ (km/s)	5

用单脉冲信噪比表示的雷达方程如式(1):

$$SNR = \frac{P\sigma(\eta A)^2 t_{ot}}{4\pi R^4 \lambda^2 L k T_s F_n} \tag{1}$$

其中， $P$  为子阵平均发射功率， $k$  为波尔兹曼常数。

(1) 密集布阵:

参考条件 1: 1 个子阵自发自收，工作在宽发宽收状态下，信噪比为:  $SNR1 = -12.2$  dB。

参考条件 2(A1): 1 个子阵发射，20 个子阵密集排布，接收做 DBF 处理，实现宽发窄收，相对于参考条件 1，接收增益提高了 20 倍，信噪比为:  $SNR2 = SNR1 \times 20 = 0.8$  dB。

参考条件 3: 20 个子阵密集排布，发射码分正交信号，接收做 DBF 处理，实现宽发窄收，相对于参考条件 2，发射功率提高了 20 倍，对 20 组码的信号做相参积累，信噪比可提高 20 倍，为:  $SNR3 = SNR2 \times 20 = 13.8$  dB。

参考条件 4: 20 个子阵密集排布，实现窄发窄收，适用于单目标跟踪模式，相对于参考条件 1，收/发天线增益和发射功率均增加了 20 倍，信噪比可提高 39 dB,  $SNR4 = SNR1 \times 20$  (功率)  $\times 20$  (发射面积)  $\times 20$  (接收面积) = 26.8 dB。

(2) 稀疏布阵: 20 个子阵稀疏排布，阵列布局如图 1 所示，实现多子阵宽发，接收 DBF 窄收，信噪比推导过程如下:

参考条件 2(定义状态为 A1)  $\geq 20$  个子阵密集排布，用孔径综合实现宽发窄收(定义状态为 A2)  $\geq$  稀疏阵列(定义状态为 A3)。

从  $A1 \geq A2$ ，增益提高了 2 倍，从  $A2 \geq A3$ ，增益提高了(135/39)倍，其中 135 为稀疏阵换为满阵

的等效相位中心信号数量，39 为密集阵换为满阵所使用的等效相位中心信号数量。则稀疏阵做第 1 次孔径综合的信噪比为

$$SNR_5 = SNR_2 + 3 + 10\lg(135/39) = 9.2 \text{ dB}$$

对于稀疏阵，由于可以得到两次近似满阵孔径综合的结果，可获得增益 3 dB，则稀疏阵做两次孔径综合的信噪比为： $SNR_6 = SNR_5 + 3 = 12.2 \text{ dB}$ 。

总结上述分析结果，当采用码分信号时，密集阵的信噪比仅比稀疏阵的信噪比高 1.61 dB。在上述参数下，各种收发方式的信噪比分析结果如表 3 所示。

### 5.2 功率孔径积

在功率孔径积分析时考虑的两种雷达工作模式<sup>[18]</sup>如下：

(1)多目标搜索模式下，

$$PA = \frac{4\pi \cdot SNR \cdot R^2 LkT_s F_n a}{\sigma} \quad (2)$$

其中， $a$  为搜索模式下的 3 dB 波束面积空域搜索速度(即面积覆盖率 ACR)，其表达式为

$$a = R^2 \lambda^2 / (At_{ot}) \quad (3)$$

当检测信噪比 SNR 为 13 dB 时，由系统参数可知多目标搜索模式下的功率口径积需  $PA=63.1 \text{ dB W}\cdot\text{m}^2$ 。

(2)SAR 成像模式下，

$$PA^2 = \frac{8\pi \cdot SNR \cdot R^3 \lambda LkT_s F_n v_s}{\sigma_0 \delta_r} \quad (4)$$

当成像信噪比 SNR 为 15 dB 时，由系统参数可知 SAR 成像模式下功率口径积需  $PA^2=84.2 \text{ dB W}\cdot\text{m}^4$ 。

当天线效率  $\eta = 50\%$  时，本文系统有效功率口径积为： $PA = 63.9 \text{ dBW}\cdot\text{m}^2$ ， $PA^2=84.8 \text{ dBW}\cdot\text{m}^4$ 。

本文设计的天基雷达的功率孔径积基本符合 MEO 轨道使用要求。

### 5.3 波束覆盖范围和空间分辨率

天基雷达主要用于运动目标探测，当轨道高度为 10000 km，卫星地速约为 5 km/s。当波束擦地角为 45°时，在最大作用距离 12000 km 处，由于阵波束宽度决定的瞬时覆盖面积约 22500 km<sup>2</sup>(180 km × 125 km)。

为减少波驻时间，可考虑利用稀疏阵列中的密集相邻子阵做发射 DBF，减少瞬时波束覆盖范围。若要进一步提高作用距离，需考虑再增加波驻时间。通过有源相控子阵波束的 2 维电扫可扩大探测范围。

当本文大型稀疏线阵天线在交轨方向展开，雷达工作在 MEO 轨道 10000 km 高度时，全阵波束宽度 0.01°×0.60°形成星下点空间分辨率为 1.75 km(交轨向)×104.70 km(顺轨向)。对地面和空中运动目标，利用 SAR/ISAR 成像处理方法进一步提高顺轨方向的空间分辨率到 1 km 量级是可能的。

## 6 结束语

研究大功率孔径积的天基雷达系统具有重要意义，目前中高轨天基雷达<sup>[19]</sup>已成为新的研究热点。基于大型稀疏阵列天线，本文论述了天基雷达的技术体制和关键技术，设计了基于 MEO 轨道 X 波段稀疏阵列天基雷达的系统参数并分析了其系统性能。

采用稀疏阵列天线，在同样发射功率孔径积情况下，可将有源阵天线的空间分辨率提高 3 倍，对提高运动目标远距离探测定位精度具有重要意义。本文论述的大型稀疏阵列天线为中高轨天基雷达的技术实现提供了一种新的途径。

表 3 各种收发方式的信噪比分析结果

项目	密集阵窄发窄收	密集阵宽发窄收	稀疏阵宽发窄收
信噪比(dB)	26.8	13.8	12.2
接收分辨率(°)	0.036×0.6	0.036×0.6	0.01×0.6
技术特点	适用于单目标跟踪模式，密集大阵工程实现困难	适用于多目标搜索模式	空间分辨率提高 3 倍，目标探测定位精度高，阵列稀疏布局容易工程实施，信噪比略下降 1.6 dB，适用于多目标搜索模式

## 参 考 文 献

[1] 贲德, 林幼权. 天基监视雷达[J]. 现代雷达, 2005, 27(4): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2005.04.001.  
BEN De and LIN Youquan. Space-based surveillance radar[J]. *Modern Radar*, 2005, 27(4): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2005.04.001.

[2] 陈升友. 天基雷达大型可展开相控阵天线及其关键技术[J]. 现代雷达, 2008, 30(1): 5-8. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2008.01.002.  
CHEN Shengyou. Large deployable phased array antenna for space-based radar and its key techniques[J]. *Modern Radar*, 2008, 30(1): 5-8. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2008.01.002.  
[3] GUERCI J and JASKA E. ISAT-Innovative space-based-

- radar antenna technology[C]. 2003 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston, Massachusetts, USA, 2003: 45-51.
- [4] 罗倩, 闫鸿慧. 天基雷达系统设计相关问题分析[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(5): 118-121. doi: 10.3969/j.issn.1627-9730.2008.05.033.
- LUO Qian and YAN Honghui. Analysis for space-based radar system design issues[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(5): 118-121. doi: 10.3969/j.issn.1627-9730.2008.05.033.
- [5] MARKUS P, HELMUT S, STEPHAN D, *et al.* Imaging technologies and applications of microwave radiometry[C]. European Radar Conference 2004, Amsterdam, The Netherlands 2004: 356-359.
- [6] CHEN D F, CHEN B X, and ZHANG S H. Muti-input muti-output radar and sparse array synthetic impulse and aperture radar[C]. International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006: 28-31.
- [7] MA C, YEO T S, TAN H S, *et al.* Three-dimensional ISAR imaging using a two-dimensional sparse antenna array[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 378-382. doi: 10.1109/LGRS.2008.916071.
- [8] 吴一戎, 洪文, 张冰尘, 等. 稀疏微波成像研究进展[J]. 雷达学报, 2014, 3(4): 383-395. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.14105.
- WU Yirong, HONG Wen, ZHANG Bingchen, *et al.* Current developments of sparse microwave imaging[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(4): 383-395. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.14105.
- [9] 李道京, 侯颖妮, 滕秀敏, 等. 稀疏阵列天线雷达技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 152-169.
- LI Daojing, HOU Yingni, TENG Xiumin, *et al.* Radar Technology and Its Application in Sparse Array Antenna[M]. Beijing: Science Press, 2014: 152-169.
- [10] 侯颖妮, 李道京, 洪文. 基于稀疏阵列和码分信号的机载预警雷达 STAP 研究[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 732-737. doi: 10.3321/j.issn:1000-6893.2009.04.025.
- HOU Yingni, LI Daojing, and HONG Wen. Airborn early warning radar STAP based on thinned array and code division signal[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(4): 732-737. doi: 10.3321/j.issn:1000-6893.2009.04.025.
- [11] 滕秀敏, 李道京. 艇载共形稀疏阵列天线雷达成像研究[J]. 电波科学学报, 2012, 27(4): 644-649. doi: 10.13443/j.cjors.2012.04.015.
- TENG Xiumin and LI Daojing. Airship conformal sparse array radar imaging[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(4): 644-649. doi: 10.13443/j.cjors.2012.04.015.
- [12] 李烈辰. 变换域稀疏压缩感知雷达成像技术研究[D]. [博士学位论  
文], 中国科学院电子学研究所, 2015.
- LI Liechen. Study on the technique of sparse compressed sensing radar imaging in transform domain[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electrics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [13] CLARK T and JASKA E. Million element ISIS array[C]. 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY), Boston, Massachusetts, USA, 2010: 29-36.
- [14] VAN BEZOUWEN H, FELDLE H, and HOLPP W. Status and trends in AESA-based radar[C]. 2010 IEEE MTT-S International on Microwave Symposium Digest (MTT), California, USA, 2010: 526-529.
- [15] 李道京, 滕秀敏, 潘舟浩. 分布式位置和姿态测量系统的概念与应用方向[J]. 雷达学报, 2013, 2(4): 400-405. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.13086.
- LI Daojing, TENG Xiumin, and PAN Zhouhao. The concept and application of distributed POS[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(4): 400-405. doi: 10.3724/SP.J.1300.2013.13086.
- [16] 李道京, 等. 高分辨率雷达运动目标成像探测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 89-101.
- LI Daojing, *et al.* High Resolution Radar Moving Target Imaging Detection Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014: 89-101.
- [17] CETIN M, STOJANOVIC I, ONHON N, *et al.* Sparsity-Driven synthetic aperture radar imaging: reconstruction, autofocusing, moving targets, and compressed sensing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(4): 27-40. doi: 10.1109/MSP.2014.2312834.
- [18] 王文生, 王小谟. 天基雷达的几个基本问题[J]. 现代雷达, 2007, 29(4): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2007.04.001.
- WANG Wensheng and WANG Xiaomo. Several basic questions for Space-based radar[J]. *Modern Radar*, 2007, 29(4): 1-4. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2007.04.001.
- [19] MATAR J, LOPEZ-DEKKER P, and KRIEGER G. Potential and limitations of MEO SAR[C]. EUSAR 2016, Hamburg, Germany, 2016: 1035-1039.
- 潘 洁: 女, 1977 年生, 高级工程师, 博士生, 研究方向为稀疏阵列雷达系统.
- 李道京: 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理.
- 周建卫: 男, 1989 年生, 硕士, 研究方向为外辐射源雷达系统.
- 卢晓春: 女, 1970 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为精密时间信息传输与信息处理.