

## DBF 相控阵天线在超高分辨率机载 SAR 中的应用<sup>1</sup>

王贞松 马小玲\*

(中国科学院计算技术研究所 北京 100080)

\*(中央民族大学 北京 100081)

**摘要** 该文从叠加原理和相控阵天线的扫描原理出发,提出了一种灵活方便的波束生成方法。用此方法由微带贴片天线单元组成了 145cm×48cm 的天线阵,生成了波长为 24cm,方位向半功率波束宽度为 23° 的宽波束。由合成孔径原理可知,条带 SAR 的方位分辨率随波束宽度的变宽而提高。该文将宽波束天线用于超高方位分辨率机载 SAR,计算了天线的性能指标和 SAR 的系统参数。比较了条带 SAR 和 Spotlight SAR 这两种常见的 SAR 模式的分辨率和测绘范围。

**关键词** 波束成形,宽波束,超高方位分辨率,机载 SAR

**中图分类号** TN820, TN951

### 1 引言

综合孔径雷达 (SAR) 是一种高分辨率成像雷达。其重要指标是空间分辨率 (包括方位向分辨率和距离向分辨率) 和测绘带宽度<sup>[1]</sup>。条带 SAR 和 Spotlight SAR 是两种常见的 SAR 模式。在条带 SAR 的数据采集中,天线的指向相对于飞行路线是固定的,因此雷达的直线运动就使得雷达的照射范围为一平行于飞行路线的条状区域,这就是测绘带<sup>[2]</sup>。在 Spotlight SAR 的数据采集中,传感器控制天线波束始终对准某一区域进行跟踪照射,从而获得较长的合成孔径照射时间。因此,Spotlight SAR 较一般的条带 SAR 有更高的方位分辨率;但照射 (或测绘) 区域不连续。在实际应用中,常常是使用条带 SAR 侦察大区域,获得一般分辨率的图像,然后对其中某些特殊的敏感区域进行 Spotlight SAR 的高分辨率成像,获得较为准确的信息<sup>[3]</sup>。

参考文献 [1,2] 指出条带 SAR 距离向分辨率由雷达信号带宽决定,而方位向分辨率为

$$\rho_a = \lambda / (2\beta) \quad (1)$$

也就是说,在波长一定时,要提高方位向的分辨率,应该增大天线波束宽度  $\beta$ 。但一定尺寸的天线,当均匀馈电时,其波束宽度是一定的;并且,波束宽度要求越宽,其尺寸就越小,天线的增益也就较小。另外,天线波束的旁瓣对 SAR 的性能影响也很大,例如,方位模糊度等。综上所述,对一定尺寸天线的要求包括下面 3 个方面:一定的波束宽度、尽量大的增益和尽量低的旁瓣。综合考虑以上的要求,对天线均匀馈电,是难于满足的。因此,需要对天线非均匀馈电,寻求天线合适的口面,以生成低旁瓣的宽波束,一般用相控阵天线来实现。

## 2 宽波束、低旁瓣的波束生成方法与数字波束形成 (DBF)

### 在相控阵天线中的应用

由上面的讨论可知,要提高 SAR 方位向分辨率,生成低旁瓣的宽波束是问题的关键。文献 [4-6] 指出,可用傅氏变换 (Fourier transform) 和 Woodward-Lawson 法等来生成所需形状的波束。原则上说,它们可生成任意形状的波束,但也存在一些局限。当用傅氏级数方法综合离散阵时,需设定合适的阵因子,并且会出现吉布斯现象。而 Woodward-Lawson 法是在所需方向图

<sup>1</sup> 2001-05-21 收到, 2002-01-08 定稿  
国家自然科学基金 (NFNS 69896250-2) 项目的资助

不同的离散点上采样，因此，所合成的方向图在采样点上完全确定，但在两点之间的值没有有效的控制。

受相控阵波束扫描原理<sup>[7-9]</sup>的启发，下面提出生成宽波束、低旁瓣的一种简单有效的方法。

如图 1 所示  $(2N + 1)$  元均匀线阵，当各元相位按线性规律分布时，第  $n$  个阵元的激励电流为  $I_n e^{-j\varphi_n}$ ，阵中各元的激励相位  $\varphi_n = n\varphi_0$ ， $\varphi_0 = kd \sin \theta_B$ ，波束指向为  $\theta_B$ 。其中  $d$  为单元间距。

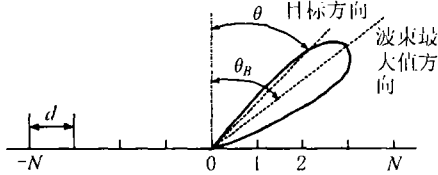


图 1  $(2N + 1)$  单元线阵图

对于线性传播媒质，电磁场方程是线性的。在不考虑天线系统的非线性因素时，设置多个馈源可得到多个波束；而天线系统的实际馈源就是各个激励源的线性叠加，天线的方向图也就是相应的多个波束在空间线性叠加的结果。通过调整波束的个数和波束的指向，可以得到合适的波束宽度和旁瓣特性。

从原理上看，这种方法与 Woodward-Lawson 法类似，同样是由多个波束来合成所需的形状；不同的是每个波束不用限制为均匀馈电，每个波束的指向也可以进行调整。因此，生成的波束可以得到更有效的控制。代价是为了得到最优的波束形状，需要进行多次调整运算。但由于计算机技术的不断发展，可以方便、快捷地得到生成所需波束的天线单元的馈电电流的幅度和相位。（作为一个例子，本文 3.2.2 节中由两个波束合成了一个宽波束，如图 4 所示。）

在上述方法中，对应于发射波束可由发射机提供第  $n$  个阵元的激励电流  $I_n e^{-jnk d \sin \theta_B}$ ，激励电流的幅值和相位由计算机进行控制；对应于接收波束则是由计算机或专用的数字波束形成处理机提供的为使波束按预定的波束指向  $\theta_B$  而进行的阵内相位补偿和降低天线副瓣而进行的幅度加权。计算机或数字形成处理机可灵活地控制波束指向和幅度加权，而且比较容易补偿各单元的幅相误差，这也是数字波束形成的优势。

### 3 将宽波束天线用于超高分辨率机载 SAR(0.3m×0.3m)

#### 3.1 系统的信号设计和方位向波束宽度要求

雷达的线性调频信号，其脉宽  $\tau = 2\mu s$ ，带宽  $B = 600\text{MHz}$ ，雷达距离向分辨率<sup>[1,2]</sup>为

$$\rho_R = c/(2B) = 3.0 \times 10^8 / (2 \times 6.0 \times 10^8) = 0.25\text{m}$$

要求  $\rho_a = 0.3\text{m}$ ，当取载波频率  $f_0 = 1250\text{MHz}$  时，其波长  $\lambda = 0.24\text{m}$ 。因此波束宽度由 (1) 式得

$$\beta = 0.24 / (2 \times 0.3) = 0.4\text{rad} = 23^\circ \tag{2}$$

#### 3.2 天线设计

3.2.1 天线单元 天线单元用微带贴片天线，各参数如表 1 所示。

表 1 天线贴片单元参数

长度 (cm)	宽度 (cm)	高度 (cm)	介电常数	谐振频率 (GHz)	波束效率 * <sup>1</sup>	天线效率	波束宽度 $\varphi = 90^\circ$	方向性系数 (dB)	平均方向性系数 * <sup>2</sup> (dB)
10.65	11.84	0.8	1.05	1.25	60%	80%	89.8°	7.85	6.13

注 \*<sup>1</sup>：波束效率是指贴片单元在方位角  $\theta$  满足  $0 \leq \theta \leq 89.8^\circ/2$ ；俯仰角  $\varphi$  满足  $0 \leq \varphi \leq 360^\circ$  范围内辐射的功率与所辐射的总功率的比值；

\*<sup>2</sup>：平均方向性系数指天线在波束宽度内的平均功率流密度与输入的有功功率被直接均匀分配到空间各个方向时的平均功率流密度的比值。

3.2.2 天线阵的设计 贴片单元按图 2 组成矩形平面阵,  $y$  向为贴片单元宽度方向,  $x$  向为贴片单元长度方向, 沿  $x$  向馈电,  $yo z$  平面 ( $\varphi = 90^\circ$ ) 为天线的  $H$  面, 位于原点的第 00 号单元为阵的中心点。

沿  $y$  向, 机载 SAR 安装的物理尺寸为 1.5m; 沿  $x$  向取 3 行线阵 (即  $M = 1$ )。要满足方位分辨率的要求, 由 (2) 式, 天线阵波束宽度应为  $23^\circ$ 。下面按天线阵生成波束的要求, 以及机载 SAR 安装的物理尺寸的限制, 提出以下 4 种方案, 进行比较和选择。

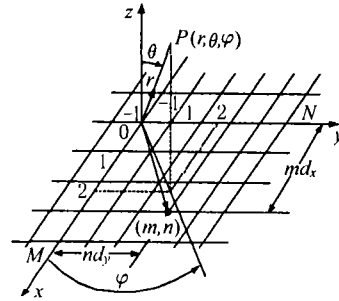


图 2 矩形平面阵

方案 1 幅相均匀馈电 (小天线), 沿  $y$  向单元个数取为 3 (即  $N = 1$ )

方案 2 幅相均匀馈电, 沿  $y$  向单元个数取为 9 (即  $N = 4$ )

方案 3 幅相非均匀馈电, 沿  $y$  向单元个数取为 9 (即  $N = 4$ )

方案 4 幅度均匀, 相位加权馈电, 沿  $y$  向单元个数取为 6

综上, 列出天线阵参数如表 2 所示。

表 2 天线阵参数

参数	4 种方案			
	1. 幅相均匀馈电 (小天线)	2. 幅相均匀馈电	3. 幅相加权馈电	4. 幅度均匀相位加权馈电
单元间距 * <sup>1</sup>	$d_x = d$ $d_y = d_{\text{uni}}$	$d_x = d_y = d$	$d_x = d_y = d$	$d_x = d$ $d_y = d_{\text{uni}}$
单元个数 * <sup>2</sup>	3 × 3	9 × 3	9 × 3	6 × 3
天线阵尺寸 * <sup>3</sup>	54cm × 48cm	145cm × 48cm	145cm × 48cm	150cm × 48cm
方位向波束宽度	23°	8.4°	23°	23°
波束效率 * <sup>4</sup>	44.3%	18.4%	48.4%	44.3%
方向性系数 (dB)	17.7	22.0	18.0	17.7
平均方向性系数 (dB)	16.4	21.3	16.8	16.4
副瓣电平 (dB)	-12.0	-13.2	-36.5	-12.0
辐射电阻 (Ω)	5.8	6.4	6.3	11.7
平均增益 (dB)* <sup>5</sup>	15.4	20.3	15.8	15.4
沿 $y$ 向单元 馈电电流 幅度 (相位)* <sup>6</sup>	1.00(0°)	1.00(0°)	0.00(0°)	1.00(1.21°)
	1.00(0°)	1.00(0°)	0.03(180°)	1.00(0.00°)
	1.00(0°)	1.00(0°)	0.18(0°)	1.00(-1.21°)
	1.00(0°)	1.00(0°)	0.70(0°)	1.00(-1.21°)
	1.00(0°)	1.00(0°)	1.00(0°)	1.00(0.00°)
	1.00(0°)	1.00(0°)	0.70(0°)	1.00(1.21°)
	1.00(0°)	1.00(0°)	0.18(0°)	
	1.00(0°)	1.00(0°)	0.03(180°)	
	1.00(0°)	0.00(0°)		

注 \*<sup>1</sup>: 单元间距  $d = 0.67\lambda_0 = 16.1\text{cm}$ ,  $d_{\text{uni}} = 0.75\lambda_0 = 18\text{cm}$ , 波长  $\lambda_0 = 24\text{cm}$ ; \*<sup>2</sup>: 单元个数为平面阵  $y$  向个数 ×  $x$  向个数; \*<sup>3</sup>: 天线阵尺寸指平面阵  $y$  向长度 ×  $x$  向长度; \*<sup>4</sup>: 波束效率对应于天线阵在  $\theta$  等于方位向半功率波束宽度的立体角内辐射的功率与天线阵辐射的总功率的比值; \*<sup>5</sup>: 平均增益等于平均方向性系数乘以天线效率; \*<sup>6</sup>: 这里指的是天线阵沿  $y$  向每个单元的馈电电流的情况, 天线阵沿  $x$  向每个单元馈电电流的幅度和相位相同。

按上述 4 种方案组成的平面阵, 当馈电电流幅值的平方和相等 ( $\sum_n I_n^2 = 8.2$ ) 时, 其在  $yo z$  平面的方向图如图 3 所示. 其中方案 3 第一旁瓣电平为  $-36.5\text{dB}$ , 方案 2 第一旁瓣电平为  $-13.2\text{dB}$ , 方案 1、4 第一旁瓣电平为  $-12\text{dB}$ .

方案 3 是按第 2 节所述的波束生成方法, 用 2 个由升余弦窗 (Hanning 窗) 幅度加权馈电的波束合成的波束宽度为  $23^\circ$  的宽波束, 如图 4 所示. 升余弦窗函数为  $w(n) = 0.5 + 0.5 \cos(n\pi/N)$ ,  $-N \leq n \leq N$ . 为生成所需波束单元馈电情况如表 3 所示.

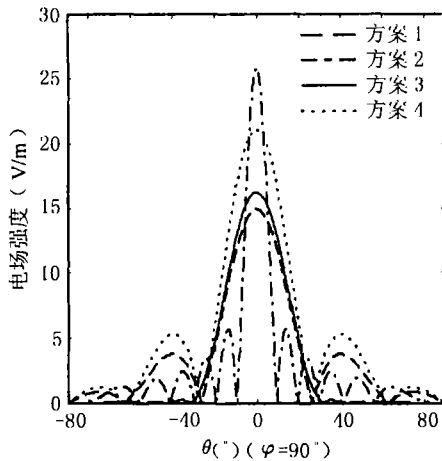


图 3 4 种方案组成平面阵其  $yo z$  平面的方向图 (馈电电流幅值平方和相等)

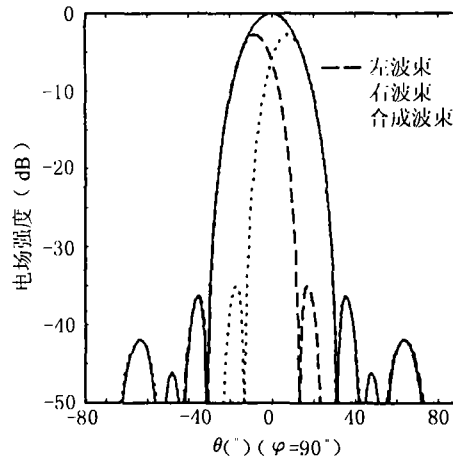


图 4 2 个升余弦窗加权馈电的波束 (data1、data2) 合成波束宽度为  $23^\circ$  的宽波束 (data3)

表 3 生成所需波束的天线单元 ( $-N \leq n \leq N$ ) 馈电的幅度\*、相位

波束	单元编号								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
左波束	0	0.07	0.25	0.43	0.50	0.43	0.25	0.07	0
	$0^\circ$	$-103^\circ$	$-69^\circ$	$-34^\circ$	$0^\circ$	$34^\circ$	$69^\circ$	$103^\circ$	$0^\circ$
右波束	0	0.07	0.25	0.43	0.50	0.43	0.25	0.07	0
	$0^\circ$	$103^\circ$	$69^\circ$	$34^\circ$	$0^\circ$	$-34^\circ$	$-69^\circ$	$-103^\circ$	$0^\circ$
合成波束	0	0.03	0.18	0.70	1.00	0.70	0.18	0.03	0
	$0^\circ$	$180^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ$	$180^\circ$	$0^\circ$

注\*: 幅度已相对于合成波束的馈电幅度的最大值归一化

由于所取的左右两波束是对称的情形, 合成波束所需的馈电电流是左右两波束的馈电电流的叠加, 因此, 合成波束的馈电情况相对来说就比较简单, 从上面所示的情况可以看出, 只有编号为  $-3$  和  $3$  的两天线单元的馈电电流相位是  $180^\circ$ , 其余的单元馈电电流相位是  $0^\circ$ .

方案 4 是在方案 1 的基础上形成的, 具体做法如下: 方案 1 在  $y$  向有 3 个单元, 生成的波束指向  $\theta = 0^\circ$ ; 在方案 4 中, 用两个同方案 1 的天线阵沿  $y$  向并列, 生成的波束如图 5 所示, 调整波束指向, 让两波束能量在所照射的目标处叠加. 与方案 1 相比, 可提高系统的信噪比<sup>[10]</sup>.

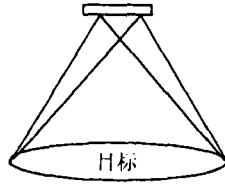


图 5 两波束天线阵

### 3.3 天线阵性能分析

4 种方案中, 天线阵在距离向的半功率波束宽度都为  $25^\circ$ 。

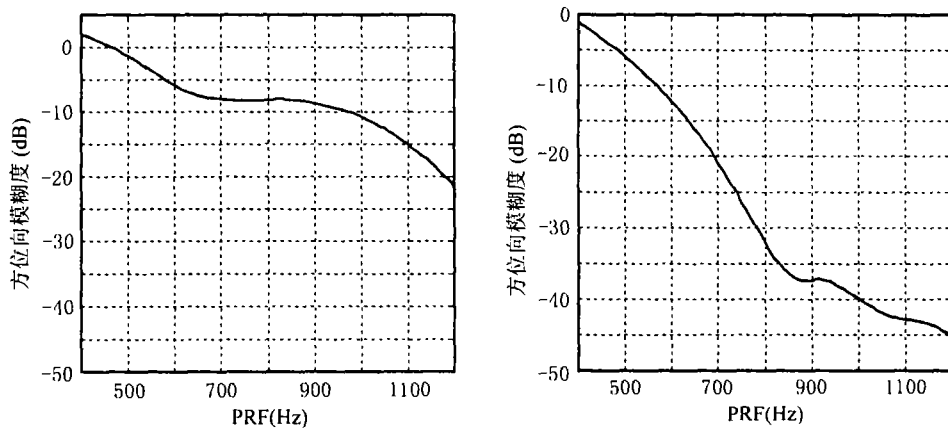
由表 2 可以看出, 对于幅相均匀馈电的第一种方案, 为满足波束宽度的要求, 限制了天线阵的尺寸。方案 4 由于两波束指向相对于方案 1 只有很小的偏离 ( $\text{tg}\theta_B = 1.5d_{\text{uni}}/h$ )。其中,  $d_{\text{uni}}$  为贴片单元间距,  $h$  为飞机高度。因此两种方案的参数基本相同, 只是辐射电阻不同。但方案 4 由于两波束信号直接叠加, 而噪声是功率相加, 因此, 与方案 1 相比, 提高了系统的信噪比。

方案 2 可得到最大的增益, 但其波束宽度太小, 不能满足系统要求, 而且其波束效率也较低, 从能量有效利用的角度来说, 也不是好的方案。

由上面的结果显示, 方案 3 组成的非均匀馈电的天线阵是较好的。在满足波束宽度的情况下, 有最低的旁瓣电平, 平均增益和波束效率都较高; 但天线单元数较均匀馈电的情况要多。

### 3.4 系统性能分析

3.4.1 方位模糊度 图 6 示出方位模糊<sup>[11]</sup>随 PRF(400Hz~1200Hz) 变化的曲线, 其中图 6(a) 为均匀馈电的情况, 图 6(b) 为非均匀馈电的情况。



(a) 均匀馈电 (-8.0dB~800Hz)

(b) 非均匀馈电 (-32.1dB~800Hz)

图 6 方位模糊随 PRF 变化曲线

由上图显示, 非均匀馈电的天线阵由于其波束旁瓣低, 方位模糊的情况较均匀馈电的情况要好。当 PRF 都为 800Hz 时, 均匀馈电天线阵的方位模糊为  $-8.0\text{dB}$ , 非均匀馈电天线阵的方位模糊为  $-32.1\text{dB}$ 。

3.4.2 系统信噪比 对于分布目标, 雷达方程可写为

$$\text{SNR} = \frac{P_r}{P_n} = \frac{P \int [G^2(\theta, \varphi) \lambda^2 \sigma(\theta, \varphi) / (4\pi)^3 r^4] dA}{kT_s F_{op} \Delta f}$$

式中  $A$  为天线波束所照射的目标面积。

考虑到合成孔径雷达距离向和方位向压缩后,信噪比提高,由文献 [12] 给出,合成孔径雷达方程为

$$\text{SNR} = P_t G^2 \lambda^3 \sigma \delta r / [2(4\pi r)^3 v F_{op} k T_s] \quad (3)$$

用方案 3 设计的天线阵,当目标距离  $r$  设计为 19.4km 时,发射机峰值功率为 1.5kW。具体参数如表 4 所示。

表 4 SAR 的指标参数

参数	数值	参数	数值
飞机高度 $h$	6000m	多普勒带宽 $B_p$	499Hz
飞行速度 $V$	150m/s	方位模糊度	-32.1dB
载波频率 $f_0$	1.25GHz	测绘带宽度	62.6km-11.8 km=50.8km
波长 $\lambda$	0.24m	PRF	800Hz
脉宽 $\tau$	2 $\mu$ s	天线的平均增益	15.8dB
方位向波束中心离地面距离 $r$	19.4km	最大脉冲重复频率 prfmax	2.39kHz
运行噪声系数 $F_{op}$	1.65	距离向分辨率 $\delta_r$	0.30m
系统噪声温度 $T_s$	450K	方位向分辨率 $\rho_a$	0.30m
图像信噪比 SNR	10dB	峰值功率 $P$	1.5kW
后向散射系数 $\sigma$	-15dB	平均功率 $PT$	2.3W

## 4 讨 论

### 4.1 功率与噪声比

由所给参数计算出发射机的发射峰值功率为 1.5kW, PRF 取为 800Hz 时,方位模糊度可达到 -32dB。由于所取的 PRF 值较低,因此,距离模糊可忽略。要提高图像信噪比,可提高发射机的发射功率,从计算的结果看,有较大的富裕度。

### 4.2 天线效率

天线效率由天线的热损耗(如铜损、介质损耗等)和阻抗不匹配引起反射损耗等因素决定。增加天线厚度,减少介质损耗可提高辐射效率。但天线厚度的增加,会使天线表面波损耗增加。另外,天线系统的匹配也是提高天线效率的关键。在本文中,波束的形成依赖不均匀馈电。可利用不等分功率分配器来馈电,但这种方案会使馈线系统的损耗增加。如用分布式发射机方案,特别是源相控阵方案,可使馈电系统的损耗降到最小。

### 4.3 与 Spotlight SAR 比较优缺点

宽波束条带 SAR 可以达到很高的方位分辨率,如本文中为 0.3m,测绘范围也比较大。但正是由于波束较宽,能量分配在较大的范围内,因此天线阵的增益比较低。Spotlight SAR 通过增加对目标的观测时间来提高分辨率,换句话说,是将分配至整个条带的能量集中在小的范围内,以此提高小测绘范围的分辨率,但牺牲了测绘范围,测绘区域不再连续。在发射功率容许的情况下,宽波束条带 SAR 有更大的价值。

## 参 考 文 献

- [1] 魏钟铨,王贞松,陈元藻,李春升,高选正等,合成孔径雷达卫星,北京,科学出版社,2001年2月,第一章,第三章。
- [2] 张澄波,综合孔径雷达—原理、系统分析与应用,北京,科学出版社,1989.11,第三章。
- [3] 张 益,高分辨率聚束 SAR 数据处理技术的研究,硕士论文,第二章,中国科学院电子学研究所,1998。
- [4] C. A. BALANIS, Antenna Theory: Analysis and Design, second edition, John Wiley & Sons, INC. 1997, Chapter 7.
- [5] 王朴中,石长生,天线原理,北京,清华大学出版社,1993年8月,第三章。
- [6] R. S. Elliot, A new technique for shaped beam synthesis of equispaced arrays, IEEE Trans. on AP, 1984, AP-32(10).

- [7] 张光义著, 相控阵雷达系统, 北京, 国防工业出版社, 1994.8.
- [8] R. C. Hansen, Phased Array Antennas, John Wiley & Sons, INC. 1998.
- [9] 张 钧, 刘克诚, 张贤铎, 赫崇骏编著, 微带天线理论与工程, 北京, 国防工业出版社, 1988.7, 第七章.
- [10] A. Currie, M. A. Brown, Wide-swath SAR, IEE Proc.-F, 1992, 139(2), 122-135.
- [11] J. C. Curlander, R. N. McDonough, Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, INC. 1991, Chapter 2, 6
- [12] G. Franceschetti, R. Lanari, Synthetic Aperture Radar Processing, CRC Press LLC 1999, Chapter 6, 1.

## THE APPLICATION OF PHASED ARRAY ANTENNA WITH DBF FOR THE AIRBORNE SAR OF ULTRAHIGH AZIMUTH RESOLUTION

Wang Zhensong    Ma Xiaoling\*

(*Institute of Computing Technology, CAS, Beijing 100080, China*)

\*(*Central University of Nationalities, Beijing 100081, China*)

**Abstract** This paper proposes a new flexible method of the beam shaping based on superposition principle and the scanning principle of phased array antenna. We designed a 145cm×48cm array composed of microstrip patch elements with the wavelength of 24cm. In the azimuth direction, the pattern of this array has 23° half-power beam width. According to the principle of the synthetic aperture, the azimuth spatial resolution of the strip SAR is improved dramatically with wide beam. In this paper, the wide beam antenna array is used as the antenna of an airborne SAR with ultrahigh azimuth resolution. The parameters of the antenna and the SAR system are calculated and are compared between the strip-mapping SAR and the Spotlight SAR.

**Key words** Beam shaping, Wide beam, Ultrahigh azimuth spatial resolution, Airborne SAR

王贞松: 男, 1945 年生, 研究员, 博士生导师, IEEE 会员, 主要从事无线电物理、微波遥感技术、合成孔径雷达成像系统方面的研究.

马小玲: 女, 1968 年生, 博士, 主要从事通信与遥感、天线技术方面的研究.