

多极化星载合成孔径雷达系统新工作方式及模糊分析¹

戴博伟 杨汝良

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 模糊是影响合成孔径雷达 (SAR) 图像质量的主要因素之一, 多极化星载 SAR 的系统设计要求尽可能地抑制模糊, 提高图像质量。现有的多极化 SAR 系统极化时分工作方式虽然简单易行, 但在高轨道星载条件下系统的距离模糊问题变得十分严重。为了有效地解决这一问题, 该文提出极化频分和极化码分两种新的工作方式, 并对它们进行了比较。计算表明这两种新的工作方式确实可以提高系统对模糊的抑制程度。

关键词 多极化星载合成孔径雷达, 工作方式, 模糊分析, 距离模糊抑制

中图分类号 TN951

1 引言

多极化合成孔径雷达 (SAR) 系统是目前微波成像技术研究与应用的一个重要领域, 它有效地提高了对场景目标信息的获取能力, 为进一步分析目标提供了有力的工具。多极化 SAR 可以获取地面大面积场景目标的极化散射矩阵, 根据目标的 Stokes 矩阵, 通过极化合成还可以获得任意极化组合下目标的回波功率。这些更加丰富的信息有利于改善对地物目标, 特别是人造目标的检测、识别和分类的能力。

近年来, 多极化 SAR 的研究陆续受到各国的重视。与传统的单通道单极化 SAR 系统相比, 多极化合成孔径雷达的系统更为复杂, 设计难度也更大。目前仅有的多极化 SAR 系统是美国 JPL 实验室机载的 AIRSAR 和低轨航天飞机载的 SIR-C/X 系统^[1,2], 它们均采用极化时分工作方式, 即通过交替发射正交线极化信号来实现对目标散射特性的同时测量。除此之外, 对于能够长期观测的多极化星载 SAR 系统目前还处于研制阶段。在较高的运行轨道下, 多极化星载 SAR 系统如果仍然采用类似的极化时分工作方式, 系统会面临严重的模糊问题。本文在分析了极化时分工作方式的基础上提出了两种新的工作方式, 即通过极化频分或极化码分的方法来实现对目标多极化参数的同时测量。计算表明采用这两种新的工作方式可以在一定程度上抑制模糊, 提高多极化 SAR 图像的质量。本文最后对各种工作方式下系统的性能和复杂度做了比较。

2 SAR 系统模糊问题

SAR 系统的模糊包括方位模糊和距离模糊^[3]。方位模糊是因以脉冲重复频率 (PRF) 对方位向多普勒回波进行有限采样而引起的。时域的采样导致多普勒频谱以 PRF 为周期重复, 于是接收带宽内将出现信号的混叠。类似地, 在距离向由于前后脉冲产生的回波信号可能与所需信号同时到达天线接收端, 系统就会产生距离模糊。模糊问题是合成孔径雷达脉冲工作体制的必然结果, 它严重地降低了 SAR 的成像质量。

2.1 方位模糊

我们用方位模糊信号与 SAR 处理器带宽 B_p 内有用信号功率的比值来衡量系统的方位模糊程度, 并称之为方位模糊度 (AASR), 可以用下式进行计算:

$$\text{AASR} = \frac{\sum_{m=-\infty}^{+\infty} (m \neq 0) \int_{-B_p/2}^{B_p/2} G^2(f + m \cdot \text{PRF}) df}{\int_{-B_p/2}^{B_p/2} G^2(f) df} \quad (1)$$

¹ 1999-11-03 收到, 2000-02-24 定稿

式中 $G(f)$ 为天线方位方向图

$$G(f) = \frac{|\int_{-L_a/2}^{L_a/2} E(x) \cdot \exp[j \cdot (\frac{\pi f}{v_a}) \cdot x] dx|^2}{|\int_{-L_a/2}^{L_a/2} E(x) dx|^2} \quad (2)$$

式中 $E(x)$ 为天线方向图加权函数, v_a 为平台速度, L_a 为天线方位向长度。选择合适的加权函数可以降低系统的方位模糊度, 但这是以增加系统复杂性为代价的。

2.2 距离模糊

距离模糊是由前后脉冲回波与有用信号回波同时到达天线接收端而引起的。这种噪声对于机载 SAR 通常是不明显的, 但对于星载 SAR 系统而言, 从发射脉冲时刻到接收回波时刻之间可能会有很多个脉冲重复周期 ($PRT=1/PRF$), 这样距离模糊问题就变得很突出了。

星载 SAR 系统的几何关系如图 1 所示。

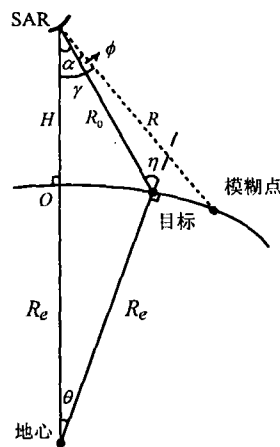


图 1 星载 SAR 几何关系图

我们考虑对于数据记录窗内一给定的时间 t_i , 模糊信号来自以下斜距:

$$R_{ij} = c(t_i + j \cdot PRT)/2 \quad (3)$$

其中 $j = \pm 1, \pm 2, \dots$ 。对于前面的干扰脉冲, j 为正值, 后续的干扰脉冲, j 为负数。而 j 在正负向上可取到的最大值是由轨道高度与 PRT 决定的。由图 1 的几何关系, 我们有

$$\gamma_{ij} = \cos^{-1}[(R_{ij}^2 + R_s^2 - R_e^2)/(2R_{ij}R_s)] \quad (4)$$

$$\eta_{ij} = \sin^{-1}[R_s \cdot \sin(\gamma_{ij})/R_e] \quad (5)$$

$$\phi_{ij} = \gamma_{ij} - (\alpha + \delta) \quad (6)$$

以上各式中 γ_{ij} 为波束视角; η_{ij} 为雷达波束入射角; ϕ_{ij} 为天线离轴角; α 为中心视角; δ 天线横滚角。将数据记录窗内由前后脉冲带来的所有模糊信号相累加, 与有用信号功率的比值即得整个测绘带内距离模糊度 RASR, 其计算表达式为

$$RASR = \sum_{i=1}^N S_{ai} / \sum_{i=1}^N S_i \quad (7)$$

式中 N 为数据记录窗内回波信号的采样数, S_{ai} 和 S_i 分别为接收机输出端模糊信号功率和有用信号功率:

$$\left. \begin{aligned} S_i &= \sigma_{ij}^0 G_{ij}^2 / R_{ij}^3 \sin(\eta_{ij}), & j = 0 \\ S_{ai} &= \sum_{j \neq 0} \sigma_{ij}^0 G_{ij}^2 / R_{ij}^3 \sin(\eta_{ij}), & j \neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 G_{ij} 是距离向天线方向图; σ_{ij}^0 为在给定 η_{ij} 下的归一化后向散射系数, 在一般情况下可用一负指数函数近似: $\sigma_{ij}^0 = e^{-\eta_{ij}/\eta_0}$. 选用具有较强旁瓣抑制性能的天线方向图加权可以明显改善系统距离模糊度. 对于距离向余弦分布天线, 其远场方向图为

$$G_{ij} = \left\{ \frac{\pi}{4} [\text{sinc}[\pi W_a \sin(\phi_{ij} + \pi/2)/\lambda] + \text{sinc}[\pi W_a \sin(\phi_{ij} - \pi/2)/\lambda]] \right\}^2 \quad (9)$$

式中 ϕ_{ij} 为天线波束离轴角, W_a 为天线距离向尺寸, λ 为波长. 由 (3)-(9) 式我们可以计算出整个测绘带内或测绘带内某一点 (对应于某一特定 i 值) 的距离模糊度 RASR.

由以上的定义可知, 方位模糊度与距离模糊度的大小在很大程度上依赖于系统 PRF 的选择. 过低的 PRF 值会导致方位向频谱混叠而增加方位模糊, 而过高的 PRF 则会因脉冲间隔的减小而导致距离模糊的加剧. 此外, 距离模糊还会随着测绘带宽度的增加以及入射角的增大而增大. 因此, 在较大入射角下获得宽测绘带的回波数据将是一项困难的工作.

3 多极化星载 SAR 系统工作方式

多极化星载 SAR 系统设计的主要目标是在保证具有足够的空间分辨率和测绘带宽的前提下同时获得更高质量的极化 SAR 图像. 影响 SAR 图像质量的因素有很多, 其中由系统模糊带来的影响是非常重要的, 这一点对于星载 SAR 系统尤为突出. 由于多极化星载 SAR 为多通道系统, 并且不宜采用十分复杂的天线方向图加权, 因此在系统设计时应选择合适的工作方式来尽可能地减小系统模糊的影响.

3.1 极化时分工作方式

图 2 为极化时分工作方式下天线发射、接收信号的时序关系图. 在这种工作方式下, 雷达天线首先发射一个水平线极化 (H) 的脉冲, 再同时从两个通道接收水平极化 (HH) 和垂直极化 (HV) 的回波; 然后, 天线再发射一个垂直线极化 (V) 的脉冲, 并同时从两个通道分别接收水平极化 (VH) 和垂直极化 (VV) 的回波. 极化时分工作方式系统的原理框图如图 3 所示. 这种工作方式简单易行, 并有成功的系统设计可供借鉴^[1]. 但是由图 2 可以看出, 对于每一极化组合信号其方位向取样频率仅为 PRF 值的一半, 因此为了降低方位模糊度需将系统 PRF 值提高一倍, 而这样做的结果是加剧系统的距离模糊^[2]. 对于星载多极化 SAR 系统而言这一问题将更加严重.

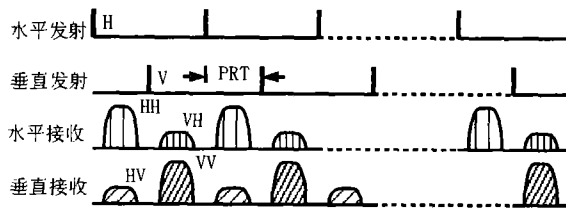


图 2 极化时分工作方式下的信号收发时序图

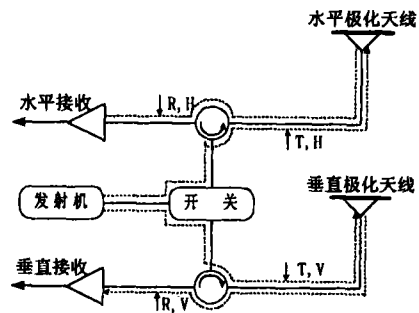


图 3 极化时分工作方式原理图

3.2 极化频分工作方式

极化频分工作方式分别由水平、垂直极化天线同时发射具有不同中心频率的两种极化 (H, V) 脉冲信号, 并且在两个接收通道同时接收回波并进行记录, 然后通过滤波器对回波信号进行分离, 从而得到目标的全极化信息. 考虑到星载平台对发射信号功率的限制, 两种极化 (H, V) 脉冲信号只能成对发射, 并且两个发射脉冲之间要留有一很窄的时隙以便功率转换. 频分信号的信号收发时序图如图 4 所示.

图中 f_{H_0} 和 f_{V_0} 分别为水平和垂直发射脉冲的中心频率. 水平和垂直两通道所发射的线性调频信号的调频斜率 k 相同, 由两信号脉冲持续时间 τ 相同可知其频谱带宽是相同的, 即:

$$B_{HH} = B_{HV} = B_{VH} = B_{VV} = k \cdot \tau \tag{10}$$

因此, 选择不同中心频率的带通滤波器就可以有效地分离相同极化信号和交叉极化信号, 以实现对目标极化特性的同时测量, 如图 5 所示.

极化频分方式所发射的 H, V 极化脉冲对在频域上是连续的, 这样发射脉冲信号带宽将要增加一倍以上, 这给天线系统的设计和制作带来很大困难. 此外, 相同和正交极化回波信号是通过带通滤波器来完成的, 高质量滤波器的制作也增加了系统的难度和复杂性.

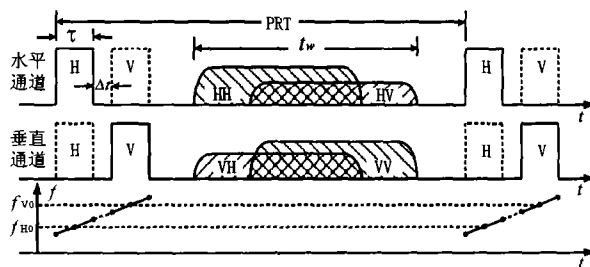


图 4 极化频分工作方式下的信号收发时序图

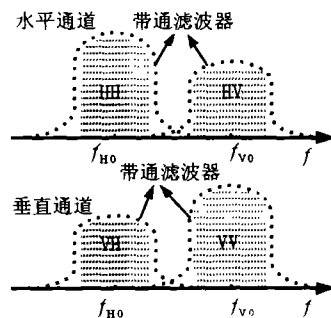


图 5 水平、垂直通道信号的分离

3.3 极化码分工作方式

极化编码工作方式要求 H 和 V 两副天线分别同时发射水平和垂直极化脉冲, 并对不同极化发射脉冲进行正交编码, 在接收通道通过正交解码来分离相同和交叉极化信号, 从而得到目标的散射矩阵. 极化码分工作方式下系统的原理框图如图 6 所示. 设发射信号 $t_H(t)$ 和 $t_V(t)$ 由两个发射通道同时发射出去, 经过一点目标的反射, 在两个不同极化接收通道的接收信号分别为

$$\left. \begin{aligned} r_H(t) &= t_H(t-\tau) \cdot h_{HH} + t_V(t-\tau) \cdot h_{HV} \\ r_V(t) &= t_H(t-\tau) \cdot h_{VH} + t_V(t-\tau) \cdot h_{VV} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 τ 表示时间延迟. 若发射信号 $t_H(t)$ 和 $t_V(t)$ 满足下面条件

$$\left. \begin{aligned} R_{HV}(\tau) &= R_{VH}^*(-\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} t_H^*(t) \cdot t_V^*(t+\tau) dt = 0, \quad \forall \tau \\ R_{ii}(\tau) &= \int t_i^*(t) \cdot t_i(t+\tau) dt = \begin{cases} 1, & \tau = 0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases}, \quad i = H, V \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

即 $t_H(t)$ 和 $t_V(t)$ 为正交信号, 则通过匹配滤波器可以分别得到目标的极化参数^[4]. 有很多种信号编码方式可以近似实现 (12) 式的条件, 但对于星载多极化 SAR 而言, 令 $t_H(t)$ 和 $t_V(t)$ 分别为具有相反调频斜率的线性调频信号是最简单的方式, 即

$$\left. \begin{aligned} t_H(t) &= \text{rect}(t/T) \cdot \exp(jkt^2/2) \\ t_V(t) &= \text{rect}(t/T) \cdot \exp(-jkt^2/2) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中 $\text{rect}(t/T) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T \\ 0, & |t| > T \end{cases}$. 从上面的式子中可以看出, 两个信号的带宽都为 $B = kT/2\pi$, 具有相同的压缩比 $R_c = TB$. 由此可得

$$|R_{HH}(\tau)| = |R_{VV}(\tau)| = T^2 \left| \text{sinc} \left[\pi R_c \frac{\tau}{T} \cdot f(\tau) \right] \cdot f(\tau) \right| \quad (14)$$

$$\begin{aligned} |R_{HV}(\tau)| = |R_{VH}(\tau)| &= \frac{T}{\sqrt{R_c}} \left| \cos \left[\frac{\pi}{2} R_c \left(\frac{\tau}{T} \right)^2 \right] \cdot C_i[\sqrt{R_c} \cdot f(\tau)] + \sin \left[\frac{\pi}{2} R_c \left(\frac{\tau}{T} \right)^2 \right] \cdot S_i[\sqrt{R_c} \cdot f(\tau)] \right. \\ &\quad \left. + j \left\{ \sin \left[\frac{\pi}{2} R_c \left(\frac{\tau}{T} \right)^2 \right] \cdot C_i[\sqrt{R_c} \cdot f(\tau)] - \cos \left[\frac{\pi}{2} R_c \left(\frac{\tau}{T} \right)^2 \right] \cdot S_i[\sqrt{R_c} \cdot f(\tau)] \right\} \right| \end{aligned}$$

式中 $f(\tau) = 1 - \frac{|\tau|}{T}$, $|\tau| \leq T$, $C_i(x) = \int_0^\pi \cos(\frac{\pi}{2}t^2) dt$, $S_i(x) = \int_0^\pi \sin(\frac{\pi}{2}t^2) dt$.

具有相反调频斜率的线性调频脉冲信号近似满足 (12) 式的条件. 在这种工作方式下系统收发信号的时序如图 7 所示.

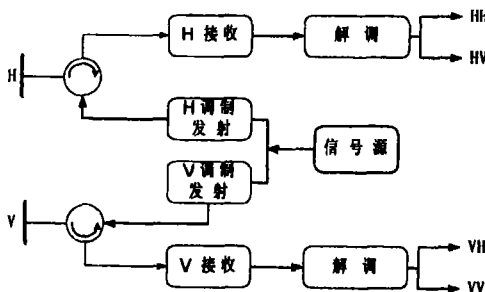


图 6 极化码分工作方式原理图

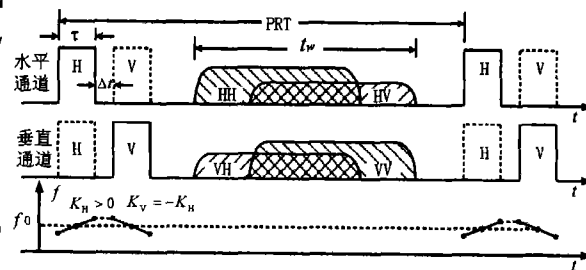


图 7 极化码分工作方式信号收发时序图

4 多极化星载 SAR 系统模糊分析

下面我们讨论在以上 3 种工作方式下多极化星载 SAR 系统的模糊情况。根据 (1) 式可知系统的方位模糊度主要取决于信号处理器的带宽, 距离模糊度主要取决于模糊脉冲的数目和功率。因此在相同的条件下 3 种设计工作方式在对方位模糊的抑制方面没有差异。表 1 中给出了 L 波段 3 种工作方式下的方位模糊度, 其数值随着 PRF 的增加而减小。对于距离模糊度而言, 则因信号的收发工作方式不同而表现出不同的抑制程度。此外, 由于目标的交叉极化回波比相同极化回波有大约 10dB 的衰减, 因此有必要对极化时分工作方式下系统距离模糊度的计算式加以修正

表 1 三种工作方式下系统的方位模糊度 (L 波段)

	PRF=1600Hz	PRF=1700Hz	PRF=1750Hz	PRF=1800Hz	PRF=1900Hz
方位模糊度 (dB)	-10.12	-12.95	-14.45	-15.95	-18.76

* 天线方向图零加权, 时分工作方式下的 PRF 值应乘以 2

$$RASR_{pol-TD} = \frac{\sum_{j \in \text{even}, j \neq 0} S_i + \sum_{j \in \text{odd}} A \cdot S_i}{S_0} \quad (15)$$

式中 A 为相应的幅度加权系数。较强的相同极化回波会对较弱的交叉极化回波造成强烈的干扰, 因此会大大增加交叉极化图像的模糊程度。

图 8 中示出了 3 种工作方式下系统的距离模糊度。根据产生距离模糊的原理, 理想情况下, 频分工作方式和码分工作方式下距离模糊度是相同的。从图中我们可以看出, 时分工作方式下相同交叉极化通道的距离模糊问题较为严重。而采用极化频分和极化码分工作方式即使在 42° 的大视角下仍可获得较宽的测绘带宽, 而此时极化时分工作方式下的图像质量将会很差。因此, 极化频分和极化码分工作方式比起极化时分工作方式来在距离模糊抑制方面的优势是十分明显的。

5 结 论

世界上最早研制成功的机载及低轨空间多极化 SAR 系统所采用的均为时分工作方式, 因为它结构简单, 易于实现。但是当轨道进一步升高, 并且需要在大视角下获得宽测绘带图像时此工作方式就很困难了。采用极化频分或极化码分工作方式均可以在一定程度上解决星载多极化 SAR 的距离模糊问题。不过极化频分工作方式下的信号带宽将增加一倍, 且需要高质量的带通滤波器来完成信号分离工作, 因此实现起来较为困难。相比之下, 极化码分工作方式也有较好的距离模糊抑制效果, 而其信号带宽并没有增加, 且下传数据量可以降低一半。但是它需要能够实现正交编码的脉压信号发生器, 并需要对发射机加以改进, 因此也增加了实现难度。关于此 3 种工作方式性能的比较列于表 2 中。除此之外, 我们还可以采取一些其他措施来对此 3 种工作方式加以改进, 进一步抑制其距离模糊度^[5], 但这都是以增加系统复杂度为代价的。

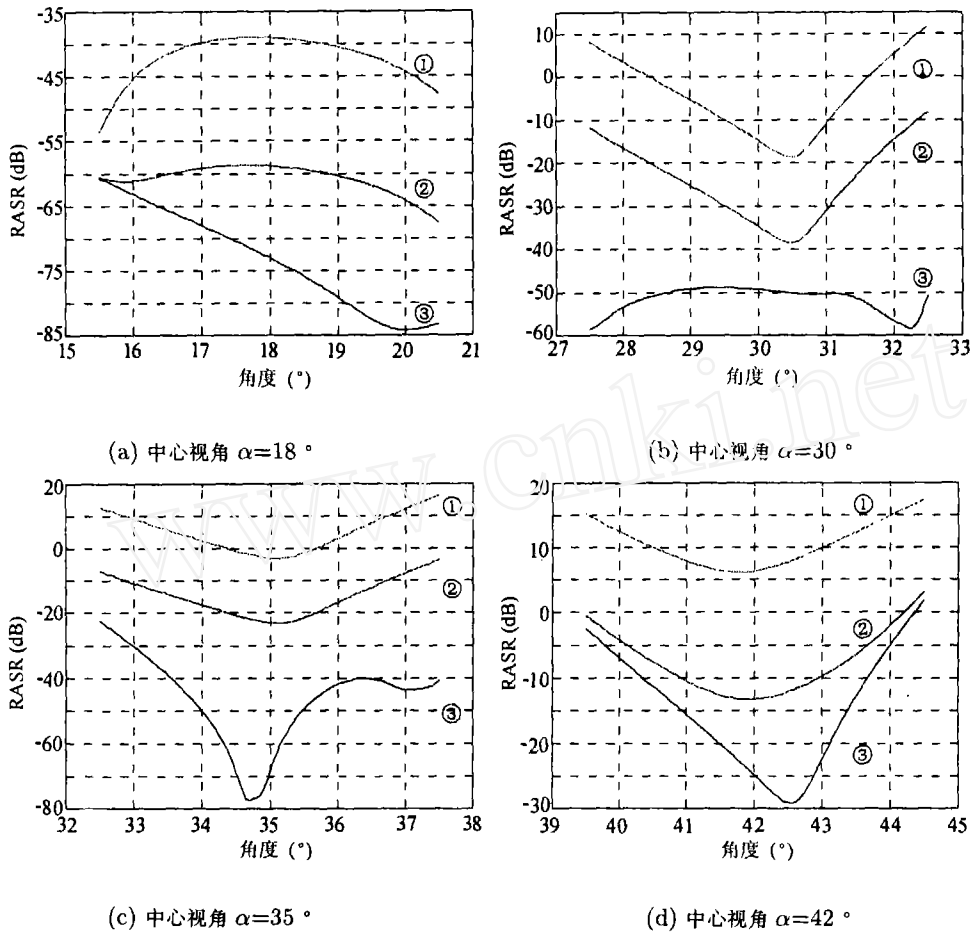


图 8 三种工作方式下系统的距离模糊度
 (①②分别为时分方式下交叉极化和相同极化通道的距离模糊度, PRF=3500Hz;)
 (③为频分和码分工作方式下的距离模糊度, PRF=1750Hz)

表 2 多极化星载 SAR 不同设计工作方式性能的比较

	距离模糊抑制程度	信号带宽	额外需要的设备	下传数据量	实现难度
极化时分工作方式	较差	B	极化转换开关	双路数据量	易
极化频分工作方式	较好	$\geq 2B$	带通滤波器, 宽带收发天线	双路数据量	较难
极化码分工作方式	较好	B	能够正交编码的线性调频信号发生器	单路数据量	较难

参 考 文 献

[1] Rolando L. Jordan, Bryan L. Huneycutt, SIR-C/X-SAR synthetic aperture radar system, IEEE Trans. on GRS, 1995, 33(4), 829-839.
 [2] Fawwaz T. Ulaby, Charles Elachi, Radar Polarimetry for Geoscience Applications, Boston, London, Artech House Inc, 1990, 281-295.
 [3] John C. Curlander, Robert N. McDonough, Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing, New York, John Wiley & Sons Inc., 1991, 296-308.

- [4] D. Giuli, L. Facheris, M. Fossi, A. Rossettini, Simultaneous scattering matrix measurement through signal coding. Proc. IEEE 1990 International Radar Conference, Arlington, Virginia, USA: 1990, 258-262.
- [5] 荆麟角, 星载 SAR 距离模糊分布规律及其改进设计, 电子科学学刊, 1994, 16(5), 490-496.

NEW OPERATION MODES AND AMBIGUITY ANALYSIS FOR SPACEBORNE POLARIMETRIC SAR SYSTEM

Dai Bowei Yang Ruliang

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract The ambiguity is one of the most important facts that influence the quality of SAR images. In the process of designing a spaceborne polarimetric SAR system it is required to restrain the system ambiguity and improve the image quality effectively. Although the available polarization time-division (PTD) operation mode of spaceborne polarimetric SAR system can be realized simply, its range ambiguity becomes very serious for the high-orbit spaceborne sensors. In order to resolve this problem, new operation modes based on polarization frequency-division (PFD) and polarization code-division (PCD) are proposed in this paper. The characteristics of these three operation modes are also compared in detail. The computation results have proved that the system range ambiguity can be restrained by using the two new operation modes.

Key words Spaceborne polarimetric SAR, Operation modes, Ambiguity analysis, Range ambiguity restrain

戴博伟: 男, 1973 年生, 博士生, 主要研究方向为合成孔径雷达信号处理, 多极化合成孔径雷达系统分析与设计以及多极化 SAR 数据处理等.

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 现正从事多频多极化合成孔径雷达、小卫星合成孔径雷达及 VSAT 卫星通讯网络等方面的研究工作.