

星载 ScanSAR 工作模式研究与设计¹

乔蓉蓉 王贞松

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 该文系统地阐述了星载 ScanSAR 系统的基本工作原理。由 ScanSAR 系统的空间几何模型, 确定了 ScanSAR 系统各子条带的空间位置, 研究了 ScanSAR 系统的方位分辨率问题, 确定了 ScanSAR 系统工作的时间关系, 各子条带的脉冲重复频率的选择及每个 burst 的样本数, 为系统设计提供了依据。重点研究了 ScanSAR 系统的信噪比及距离模糊问题, 提出了一种新的 ScanSAR 系统特有的模糊概念 ARASR, 并提出新的分析方法, 对其影响做了定量的计算。最后对 ScanSAR 系统的数据下载格式提出了建议。

关键词 ScanSAR 系统, 扫描模式, 子条带, 多视数, 脉冲重复频率, 信噪比, 距离模糊
中图分类号 TN258

1 ScanSAR 系统原理

1.1 扫描工作模式特点与工作原理

传统的合成孔径雷达天线形成的波束在对地观测时, 观测带的宽度受到天线波束宽度、数据率、回波窗口大小等的限制。而在实际的遥感应用中, 常常需要较宽的测绘带。

这样的实际系统是通过波束扫描形成的, 即利用一副天线波束视角的变化 (即天线波束的摆动), 在飞行中实现对不同子条带的扫描, 从而达到宽测绘带的目的。图 1 所示为四子条带的扫描模式工作原理图。

天线波束可沿距离向在 2 个或 2 个以上 (N 个) 子条带上交替地工作。合成孔径雷达在飞行一个合成孔径长度时每一子条带的照射时间不到 $1/N$ 的合成孔径时间 (这里考虑天线在子条带之间的转换需要一定的时间), 因此每一子条带上图像方位向的空间分辨率下降为原条带式工作模式的 $1/N$, 但测绘带宽大幅度提高。

1.2 ScanSAR 系统时间间隔定义

为方便系统参数研究的需要, 我们定义以下 ScanSAR 系统的时间关系。

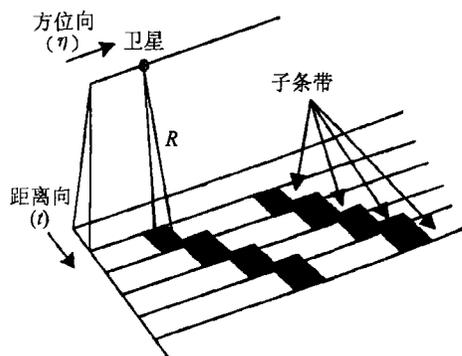


图 1 ScanSAR 工作模式示意图 (4 个子条带)

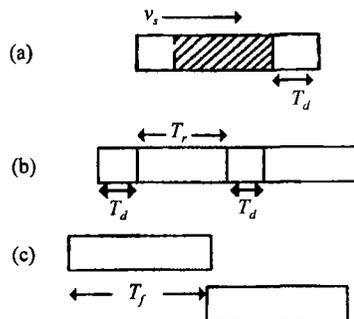


图 2 ScanSAR 时间间隔示意图

¹ 2000-06-12 收到, 2000-08-31 定稿
国家自然科学基金资助项目 (69896250-2)

定义 T_f 为 3dB 波束宽度所对应的成像周期时间, 它对应于传统 SAR 的合成孔径时间; T_d 为对某一子条带一个突发脉冲集连续成像的时间, 称之为驻留时间; T_r 为对某一子条带两次连续成像之间的时间间隔, 称之为回归时间, 它们之间的关系如图 2 所示.

扫描周期是指子条带的扫描次序, 如 1/2/3/4 是指天线从第一子条带到第四子条带顺序扫描.

2 星载 ScanSAR 系统研究与设计

ScanSAR 的系统设计主要分为以下几部分:

- (1) 确定子条带个数, 天线波束初始视角, 子条带重复区域, 卫星高度, 距离向采样样本数, 采样频率等总体指标.
- (2) 确定 ScanSAR 系统各子条带的空间位置, 如波束宽度、波束视角、作用距离、各子条带天线口面的尺寸等, 提出对相控阵天线相位加权的要求.
- (3) 确定各子条带的方位分辨率, 以及 ScanSAR 时间上的要求, 如一个子条带中每个 burst 的驻留时间, burst 之间的间隔时间, 以及扫描周期等.
- (4) ScanSAR 系统脉冲重复频率 (PRF) 的选择及各子条带的样本数的确定.
- (5) 计算各子条带信噪比.
- (6) ScanSAR 系统距离模糊的分析, 确定各子条带的距离模糊区位置, 及模糊区信号;
- (7) 分析由于波束在子条带之间的切换造成的脉冲丢失, 对下一扫描子条带回波的影响, 我们称之为 ScanSAR 系统特有的模糊效应.

2.1 ScanSAR 系统各子条带空间位置的确定

ScanSAR 系统各子条带的位置关系如图 3 所示 (只示意两个子条带).

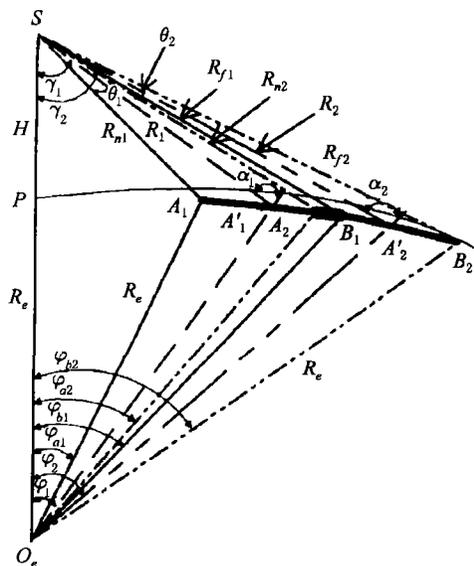


图 3 子条带位置关系示意图

图中 S 为卫星所在位置, O_e 为地心; A_1B_1 为第一子条带的地距宽度, A'_1 为波束中心位置, A_2B_2 为第二子条带的地距宽度, A'_2 为其中心位置; R_{n1}, R_1, R_{f1} 分别表示第一子条带的最近斜距, 中心距和最远斜距; R_{n2}, R_2, R_{f2} 分别表示第二子条带的最近斜距, 中心距和最远斜距; γ_1 和 γ_2 分别代表两个子条带的视角; α_1 和 α_2 表示两个子条带的入射角; θ_1 和 θ_2 分别是两个子条带的波束宽度; φ_1 和 φ_2 代表两个子条带波束中心的地心角, $\varphi_{a1}, \varphi_{b1}, \varphi_{a2}, \varphi_{b2}$ 分别对应各子条带近远距的地心角. H 为卫星高度, R_e 为地球半径.

我们计算出各子条带的波束视角变化, 波束宽度, 波束投影到地面的地距宽度, 远近作用距离等. 根据 4 个子条带的计算结果, 我们可得到扫描模式下, 视角在 35° 时总的地距宽度可达 368.2658 km. 所有推导结果列在表 1 中.

表 1 视角为 35° 时, 各子条带的空间位置与波束指向

	第 1 子条带	第 2 子条带	第 3 子条带	第 4 子条带
下视角 (°)	35	40.10	44.01	47.13
入射角 (°)	39.08	45.07	49.79	53.67
地距宽度 (km)	116.95	104.15	96.56	91.52
近距 (km)	756.74	822.45	888.41	954.50
远距 (km)	830.33	896.10	962.09	1028.20
中心距 (km)	792.02	858.34	924.61	990.88
波束宽度 (°)	6.90	5.15	4.039	3.27
斜距宽度 (km)	73.74			
总地距宽 (km)	368.27			

3 方位分辨率及时间参数的研究

3.1 方位分辨率及时间参数的确定

ScanSAR 系统设计必须满足以下几点:

- (1) 方位向相邻 burst 数据块之间要有重叠;
- (2) 每个子条带的驻留时间是一定值;
- (3) 每个子条带的回归时间是固定的;
- (4) 方位向的多视处理是按照多视周期进行的, 以优化图像的均衡。

在考虑多视处理的情况下, ScanSAR 系统子条带之间的时间有如下关系:

$$T_{fj} = T_{dj} + nT_{rj} \quad (1)$$

式中 T_f 是成像周期, T_d 是驻留时间, T_r 是回归时间, j 表示所扫描的子条带, n 是多视数。

对星载 ScanSAR 系统, T_d 和 T_f 可由下式计算:

$$T_{fj} = 0.8859\lambda R_j / (V_{gj} D_a) \quad (2)$$

$$T_{dj} = \lambda R_j / (2v_s \rho_a) \quad (3)$$

式中 R_j 是天线到某一子条带测绘带中心的作用距离; v_{gj} 是卫星对地速度; v_s 是卫星速度; ρ_a 是系统的方位分辨率。

根据 (1)-(3) 式, 可得到子条带 j 的回归时间为

$$T_{rj} = (\lambda R_j / n) [0.8859 / (v_{gj} D_a) - 1 / (2v_s \rho_a)] \quad (4)$$

所有的子条带要在约定的时间内成像, 每一子条带 j 的时间关系必须满足

$$\sum_{j=1}^N T_{dj} \leq T_{rj} \quad (5)$$

其中 N 表示一个扫描周期内子条带的个数。

由 (2)~(5) 式, 我们可得到:

$$\sum_{j=1}^N \frac{\lambda R_j}{2v_s \rho_a} \leq \frac{\lambda R_j}{n} \left[\frac{0.8859}{v_{gj} D_a} - \frac{1}{2v_s \rho_a} \right] \quad (6)$$

将上式中的 R_j 设为每个子条带的近距, 我们可得到最优的方位向空间分辨率:

$$\rho_{opt} = \frac{D_a v_{gk}}{1.7718 v_s} \left[n \sum_{j=1}^N R_j / R_k + 1 \right] \quad (7)$$

式中 R_k 标明是最近斜距值, R_j 设为每个子条带的远距, 则得到最差的方向向空间分辨率, 计算结果列在表 2 中。

表 2(a) 最近子条带视角为 35° , 视数为 4 的条件下各子条带时间关系及方位分辨率

方位分辨率 (m)	优化		88.04	
	最差		95.23	
	第 1 子条带	第 2 子条带	第 3 子条带	第 4 子条带
每个 burst 的驻留时间 (s)	0.14	0.16	0.17	0.18
每个子条带的回归时间 (s)	0.65	0.70	0.76	0.81
成像周期 (s)	2.72	2.96	3.19	3.42

表 2(b) 最近子条带视角为 35° , 视数为 2 的条件下各子条带时间关系及方位分辨率

方位分辨率 (m)	优化		46.33	
	最差		49.92	
	第 1 子条带	第 2 子条带	第 3 子条带	第 4 子条带
每个 burst 的驻留时间 (s)	0.27	0.29	0.32	0.34
每个子条带的回归时间 (s)	1.23	1.33	1.44	1.54
成像周期 (s)	2.72	2.96	3.19	3.42

4 各子条带脉冲重复频率及样本数的确定

PRF 选择受以下几个因素的限制: (1) 方位模糊与距离模糊的限制。(2) 星下点回波的干扰。(3) 发射脉冲的干扰。

根据以上分析, 我们得到可用的回波窗口, 如图 4 所示。图中 n 表明空中传播的 PRF 个数, n 所在的曲线为发射脉冲干扰区间; m 所在的曲线为星下点回波干扰区间。

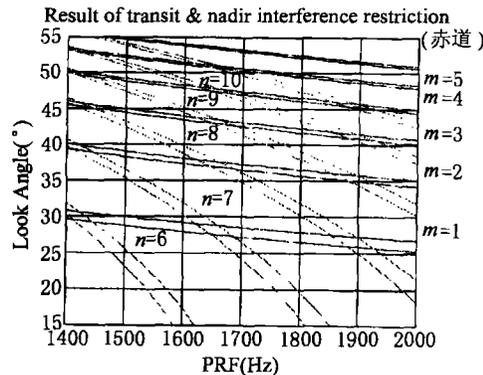


图 4 星下点回波干扰与发射脉冲干扰区间

根据前面得到 ScanSAR 系统各子条带的时间关系, 结合图 4 的干扰区间, 我们分析并计算了 ScanSAR 系统各子条带在不同 PRF 传播个数情况下的脉冲重复频率值。

ScanSAR 系统某子条带脉冲发射时间与回波窗口的时间关系如图 5 所示。

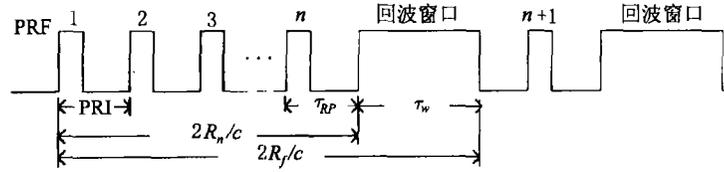


图 5 PRF 与回波窗口时间关系示意图

图中 τ_{RP} 为回波窗口的开启时间, 即脉冲前沿到回波窗口前沿的时间, 该时间是一定的; τ_w 为回波窗口延迟时间; R_n 为子条带的最近作用距离, R_f 为子条带的最远作用距离; PRI 为脉冲间隔时间; PRF1, 2, \dots , n 表示天线在发射 n 个脉冲后, 才收到地面回波。这样, 当接收机接收回波的同时, 仍有 $(n-1)$ 个脉冲在空中传播。

严格按照图 5 的时间关系, 计算脉冲间隔 PRI, 可避免发射脉冲落在回波窗口, 再结合图 4 的干扰区间, 就可选择系统中各子条带的 PRF 值。

表 3 中列出了视角 35° 下 2 视 4 视情况下各子条带的 PRF 值和每个 burst 的样本数。

表 3(a) 视角 35° 下, 视数为 4 条件下各子条带 PRF 值与样本数

空中传播 PRF 个数 n		10	11	12	13
第 1 子条带	PRF(Hz)	1798.23	1998.04		
	每个 burst PRF 个数	257	286		
第 2 子条带	PRF(Hz)	1653.50	1837.23	2020.95	
	每个 burst PRF 个数	256	285	313	
第 3 子条带	PRF(Hz)		1699.89	1869.879	
	每个 burst PRF 个数		284	312	
第 4 子条带	PRF(Hz)		1581.44	1739.59	1897.73
	每个 burst PRF 个数		283	311	339

表 3(b) 视角 35° 下, 视数为 2 条件下各子条带 PRF 值与样本数

空中传播 PRF 个数 n		10	11	12	13
第 1 子条带	PRF(Hz)	1798.23	1998.04		
	每个 burst PRF 个数	488	542		
第 2 子条带	PRF(Hz)	1653.50	1837.23	2020.95	
	每个 burst PRF 个数	486	540	594	
第 3 子条带	PRF(Hz)		1699.89	1869.88	
	每个 burst PRF 个数		539	592	
第 4 子条带	PRF(Hz)		1581.444	1739.588	1897.733
	每个 burst PRF 个数		537	591	644

5 信噪比的计算

根据雷达方程, 如 (8) 式, 我们计算了每个子条带中不同作用距离上的信噪比。

$$\text{SNR} = P_{av} \lambda^2 G^2 \sigma_0 \rho_r \rho_a N_l / ((4\pi)^3 R^4 F_{op} k T_s B_n) \quad (8)$$

$$P_{av} = P_m \times \text{PRF} \times \tau_d \quad (9)$$

$$G = 4\pi D_r D_a / \lambda^2 \quad (10)$$

(8) 式中 P_{av} 为信号平均功率, 它与信号峰值功率 P_m 、脉冲重复频率 PRF 及脉冲宽度 τ_d 有关, 如 (9) 式所示; G 为天线增益, 如 (10) 所示; ρ_a , ρ_r 分别为方位向距离向分辨率; N_l

为每条距离线与方位线样本数的乘积, 对 ScanSAR 系统, N_l 与每个 burst 的样本数有关, 等于每个 burst 的样本数与方位线样本数的乘积; R 为卫星到地面的斜距; F_{op} 为噪声系数; k 为玻尔兹曼常数; T_s 为等效噪声温度; B_n 为系统带宽; σ_0 为系统平均后向散射系数. 计算结果列在表 4 中.

表 4 视角 35° 下, 各子条带的信噪比

空中传播的 prf 个数		10	11	12	13	
第 1 子带条	PRF(Hz)	1798.23	1998.04			
	信噪比 (dB)	近距	19.01	19.93		
		中心距	18.22	19.14		
		远距	17.40	18.32		
第 2 子带条	PRF(Hz)	1653.50	1837.23	2020.95		
	信噪比 (dB)	近距	17.18	18.10	18.93	
		中心距	16.44	17.36	18.19	
		远距	15.69	16.61	17.44	
第 3 子带条	PRF(Hz)		1699.89	1869.88		
	信噪比 (dB)	近距		16.41	17.24	
		中心距		15.72	16.54	
		远距		15.02	15.85	
第 4 子带条	PRF(Hz)		1581.44	1739.59	1897.73	
	信噪比 (dB)	近距		14.84	15.66	16.42
		中心距		14.19	15.01	15.77
		远距		13.54	14.37	15.13

6 ScanSAR 系统距离模糊分析

所谓模糊是指由于无用信号与有用信号在时域或频域的混叠, 造成对有用信号的干扰. 模糊度是对这种混叠程度的度量. 对于星载 SAR 系统由于作用距离远, 模糊问题更为突出.

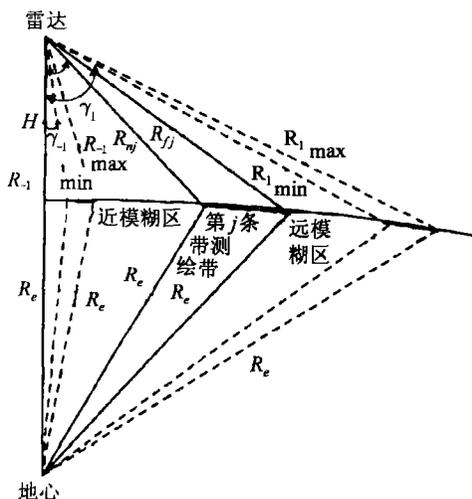


图 6 距离模糊区示意图

对传统的合成孔径雷达系统, 模糊主要包括距离模糊和方位模糊. 距离模糊是指在距离向由于某一区域的回波延时与测绘带内目标的回波延时相差脉冲重复周期的整数倍, 在回波中与测绘带的回波信号重叠在一起, 形成模糊的区域即为距离模糊区. 方位模糊是由于一些角度上的目标, 其回波的多普勒频率与主波束的多普勒频率相差脉冲重复频率的整数倍, 在方位频谱中, 这些信号将落在主波束的多普勒带宽内, 从而干扰对主波束测绘区的成像.

对 ScanSAR 系统来说, 由于多条带扫描的工作模式, 天线视角沿距离向始终处于变化之中, 故距离模糊问题对其系统设计尤为重要.

6.1 各子条带距离模糊区位置的确定

如上所述, 回波延时相差脉冲重复频率的整数倍的不同距离的回波信号在时域混叠, 产生距离模糊. 设第 j 子条带的最近、最远斜距分别为 R_{n_j}, R_{f_j} , 第 i 模糊区的最近、最远斜距 $R_{i min}, R_{i max}$ 满足:

$$R_{i \min} = R_{n_j} + ic/(2PRF_j) \quad (11)$$

$$R_{i \max} = R_{f_j} + ic/(2PRF_j) \quad (12)$$

式中 c 为光速, PRF_j 为第 j 子条带的脉冲重复频率。

对 ScanSAR 系统, 某一子条带 j 的模糊区位置如图 6 所示。这里我们只考虑 i 等于 ± 1 时的第 ± 1 模糊区, 认为其它模糊区的影响可忽略不计, 我们称这两个模糊区为该子条带的近模糊区和远模糊区。

根据 (11)(12) 式可确定模糊区所对应的视角和位置。计算结果如表 5 所示。

表 5 视角 35° , 视数为 4.2 条件下各子条带远近模糊区位置及视角

空中传播 PRF 个数		10	11	12	13	
第 1 子条带	PRF(Hz)	1798.23	1998.04			
	近模糊区 (o)	下视角	19.07	20.81		
		波束宽	11.39	10.58		
	远模糊区 (o)	下视角	38.84	38.23		
波束宽		4.59	4.74			
第 2 子条带	PRF(Hz)	1653.50	1837.23	2020.95		
	近模糊区 (o)	下视角	28.63	29.75	30.61	
		波束宽	7.52	7.15	6.87	
	远模糊区 (o)	下视角	43.40	42.89	42.47	
波束宽		3.56	3.67	3.76		
第 3 子条带	PRF(Hz)		1699.89	1869.88		
	近模糊区 (o)	下视角		35.71	36.39	
		波束宽		5.39	5.21	
	远模糊区 (o)	下视角		46.52	46.16	
波束宽			2.94	3.01		
第 4 子条带	PRF(Hz)		1581.44	1739.59	1897.73	
	近模糊区 (o)	下视角		40.18	40.75	41.20
		波束宽		4.28	4.15	4.04
	远模糊区 (o)	下视角		49.42	49.11	48.84
波束宽			2.41	2.47	2.51	

6.2 各子条带距离模糊度的确定

距离模糊度 (RASR) 表示距离模糊的严重程度, 即^[1]

$$RASR = \frac{\text{所有距离模糊区的回波信号经信号处理后的输出总功率}}{\text{测绘带的回波经信号处理后的输出功率}} \quad (13)$$

若测绘带和模糊区为漫反射分布型目标, 则距离模糊度为^[2]

$$RASR = \int_a \frac{G_r^2(x)\sigma_0(x)}{R^3(x)\sin\theta_i(x)} dx / \int_s \frac{G_r^2(x)\sigma_0(x)}{R^3(x)\sin\theta_i(x)} dx \quad (14)$$

式中 G_r 为距离向天线双程增益, σ_0 为分布目标后向散射系数, θ_i 为天线方向图角度的变化, R 为斜距, a 表示模糊区, s 表示测绘带。计算结果列在表 6 中。

表 6 各子条带距离向信号能量与 RASR

	第 1 子条带	第 2 子条带	第 3 子条带	第 4 子条带
子条带信号能量	0.2115	0.1198	0.0922	0.072
子条带模糊区信号能量	0.0308	0.00688	0.000856	0.000217
RASR (dB)	-8.362	-12.407	-20.319	-25.1911

7 ScanSAR 系统特有的距离模糊效应分析

对 ScanSAR 系统, 因其扫描式工作的特点, 天线在每个子条带之间以一定周期扫描, 天线视角不断变化, 且每个子条带脉冲重复频率不同, 存在脉冲丢失的问题. 这些丢失的脉冲不仅会造成分辨率的下降, 而且会对相邻子条带造成影响, 使图像噪声增加.

下面我们就第一子条带丢失的脉冲对第二子条带的回波影响进行分析计算.

假设两个子条带均是在发射 10 个脉冲后开始收到回波. 这里值得注意的问题是回波窗口的开启时刻与发射脉冲的前沿之间的时间是固定的, 如图 5 所示, 即每发一个脉冲 $40\mu\text{s}$ 后, 回波窗口开启. 这意味着第一子条带丢失的脉冲回波有可能落在第二子条带前 9 个脉冲的回波窗口, 因为真正第二子条带的回波在其发射 10 个脉冲后的回波窗口中才接收, 如图 7 所示 (图中 i 小于 10). 这样落在第二子条带前 9 个回波窗口中的信号并不是我们所期待的有用信号, 而是第一子条带丢失的脉冲从地面返回的回波. 我们称之为 ScanSAR 系统特有的距离模糊信号.

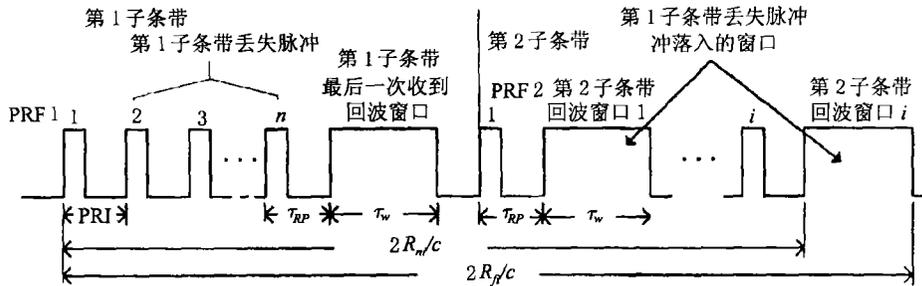


图 7 第 1 子条带丢失脉冲与第 2 子条带回波窗口时间关系示意图

由图 7, 可计算落在第二子条带前 9 个回波窗中的第一子条带丢失脉冲的位置, 即

$$R_{ni} = [(n - i)PRI_1 + (i - 1)PRI_2 + \tau_{RP}]c/2 \tag{16}$$

$$R_{fi} = [(n - i)PRI_1 + (i - 1)PRI_2 + \tau_{RP} + \tau_w]c/2 \tag{17}$$

式中 R_{ni} , R_{fi} 分别表示落在第二子条带第 i 个回波窗口的第一子条带第 i 个脉冲的空间位置; PRI_1 , PRI_2 代表两个子条带的脉冲重复周期; τ_{RP} 为回波窗口开启时间; τ_w 为回波窗的延迟时间.

我们推导了所有子条带中附加的模糊信号, 计算结果如表 7 所示. 比较表 6 与表 7 可见, ScanSAR 系统所特有的新的模糊信号对子条带信号的影响程度基本与原模糊信号相当.

所有子条带 1 发射子条带 2 接收的脉冲能量占子条带 2 回波能量比值	-21.35dB
所有子条带 2 发射子条带 3 接收的脉冲能量占子条带 3 回波能量比值	-19.44dB
所有子条带 3 发射子条带 4 接收的脉冲能量占子条带 4 回波能量比值	-18.32dB

8 星载 ScanSAR 系统数据格式的确定

由前面的研究分析, 我们在星上记录 ScanSAR 数据时, 有以下几点必须考虑: (1) 子条带的个数及各子条带的标号; (2) 每个子条带的脉冲重复频率; (3) 每个子条带 burst 的个数及其标号, 这与整个条带的成像周期有关; (4) 每个 burst 中的脉冲个数; (5) 从前面的讨论我们已知 ScanSAR 的数据特点之一是每个 burst 的天线增益不同, 因此记录每个 burst 的天线增益亦是必要的. (6) 如果考虑去除前面讨论的附加的模糊信号 ARASR 对图像的影响, 则应在回波窗口做标志位, 标明各子条带正式开始接收本子条带数据的起始位置.

9 结 论

本文基于星载 ScanSAR 系统的基本工作原理, 建立了 ScanSAR 系统的空间几何模型, 并在此基础上, 研究了 ScanSAR 系统各子条带的空间位置, 确定了各子条带的波束宽度, 波束视角, 作用距离等; 分别研究了 ScanSAR 系统的多视问题, 方位分辨率问题, 确定了 ScanSAR 系统工作的时间关系, 各子条带的脉冲重复频率的选择及每个 burst 的样本数, 为系统设计提供依据. 本文还重点研究了 ScanSAR 系统的信噪比及距离模糊问题, 针对波束在子条带之间的切换造成的脉冲丢失而提出了一新的 ScanSAR 系统特有的模糊概念, 提出了新的分析方法, 并对其影响做了定量的计算. 最后本文对 ScanSAR 系统数据下载的格式提出了建设性结论.

参 考 文 献

- [1] 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, 第三章.
- [2] J. C. Curlander, R. N. McDonough, Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing, New York, John Wiley & Sons, Inc, 1991, Chapter 1.
- [3] G. Franceschetti, R. Lanari, Synthetic Aperture Radar Processing, London, New York, Washington D.C., CRC Press, 1999, Chapter 5.
- [4] A. Curri, M. A. Brown, Wide-swath SAR, IEE Proc.-F, 1992, 139(2), 122-135.

STUDIES AND DESIGN ON SPACE-BORNE SCANSAR SYSTEM

Qiao Rongrong Wang Zhensong

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

Abstract Based on the principles of the space-borne ScanSAR, some important parameters to define the position of sub-swathes, the timing sequence of the system, the choice of the PRFs, the number of the samples of each burst and the SNR are investigated. Some critical problems about ScanSAR system are discussed, such as the number of the multi-looks, the azimuth resolution and the range ambiguities. A new concept of the range ambiguities is put forward, analyzed and verified. Based on above discussion and calculation, the data format for the practical ScanSAR system is suggested.

Key words ScanSAR system, ScanSAR mode, Sub-swath, Multi-looks, Pulse repetition frequency, Signal to noise ratio

乔蓉蓉: 女, 1965 年生, 副研究员, 研究方向为星载合成孔径雷达多模式工作系统研究与信号处理.
王贞松: 男, 1945 年生, 研究员, 研究方向微波遥感与通信系统及信号处理.