

合成孔径雷达聚束模式合成孔径长度研究¹

高祥武 * ** 雷 宏 * 杨汝良 *

*(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

** (中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 该文首先给出了传统聚束 SAR 合成孔径长度计算公式并指出了其局限性, 然后针对机载和星载两种情况下的几何模型导出了聚束 SAR 合成孔径长度计算的新公式。在星载情况下, 考虑了地速对孔径设计的影响。最后通过数值模拟分析证实了采用新公式进行计算合成孔径长度的必要性。该文为聚束 SAR 合成孔径长度提供了设计参考。

关键词: 合成孔径雷达 (SAR), 聚束模式, 机载 SAR, 星载 SAR, 合成孔径长度

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)06-0953-06

Study on the Synthetic Aperture Length of SAR Working on Spotlight Mode

Gao Xiang-wu* ** Lei Hong* Yang Ru-liang*

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

** (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The traditional formula computing the synthetic aperture length of spotlight SAR and its localization are presented in this paper firstly. Then the new formula for computing the synthetic aperture length of spotlight SAR is deducted on the basis of airborne and spaceborne geometry models. Especially in spaceborne model, the earth speed is considered. Finally, the data simulation results validate that it is necessary to use the new formula to compute the synthetic aperture length. This paper provides the reference for designing synthetic aperture length of spotlight SAR.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Spotlight mode, Airborne SAR, Spaceborne SAR, Synthetic aperture length

1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 聚束照射工作模式是在整个合成孔径时间内雷达天线波束始终照射同一块场景, 地面目标可以获得比条带 SAR 更大的合成孔径长度, 进而获得更大的方位多普勒带宽和更高的方位分辨率。聚束模式还可以在载机一次飞行过程中对目标进行多视角成像, 有助于目标检测和识别^[1], 因此聚束照射模式 SAR 在军事领域受到很大的重视。

在聚束 SAR 系统设计中, 合成孔径长度是一个非常重要的参数, 它不仅影响合成孔径雷达的成像周期, 而且影响图像的分辨能力。如何合理有效地设计合成孔径长度需要有一个普遍适用的理论依据, 本文就是对此进行研究的。

传统的聚束 SAR 合成孔径长度计算公式为^[1]

$$L = \frac{R_a \Delta \theta}{\sin(\alpha_{dc})} = \frac{R_a}{\sin(\alpha_{dc})} \frac{K_a \lambda_c}{2\rho_a} \quad (1)$$

¹ 2003-01-07 收到, 2003-06-06 改回

其中 L 为聚束 SAR 合成孔径长度, R_a 为孔径中心对应的斜距, $\Delta\theta$ 为合成孔径角, α_{dc} 为孔径中心斜视角, K_a 为方位向展宽因子, λ_c 为雷达工作中心波长, ρ_a 为方位分辨率。

必须指出, 式 (1) 是基于机载聚束 SAR 模型建立的近似计算公式, 对于机载大斜视角聚束和星载聚束情况会有很大的误差, 本文将给出普遍适用的新公式。

2 机载 SAR 聚束模式合成孔径长度

机载条件下, 雷达载机沿直线匀速飞行, 地面目标静止不动, 几何关系相对比较简单, 如图 1 所示。图 1 中, 雷达以速度 v_a 沿正 x 方向飞行, 孔径起点为 A 点, 终点为 E 点, 孔径中心在 D 点, 目标位于 O 点。根据式 (1) 计算的合成孔径为 CF , 而真正的孔径为 AE , 从图上可以看出, CF 与 AE 有很大差别, 这说明用式 (1) 来计算合成孔径长度存在误差, 应该进行修正。

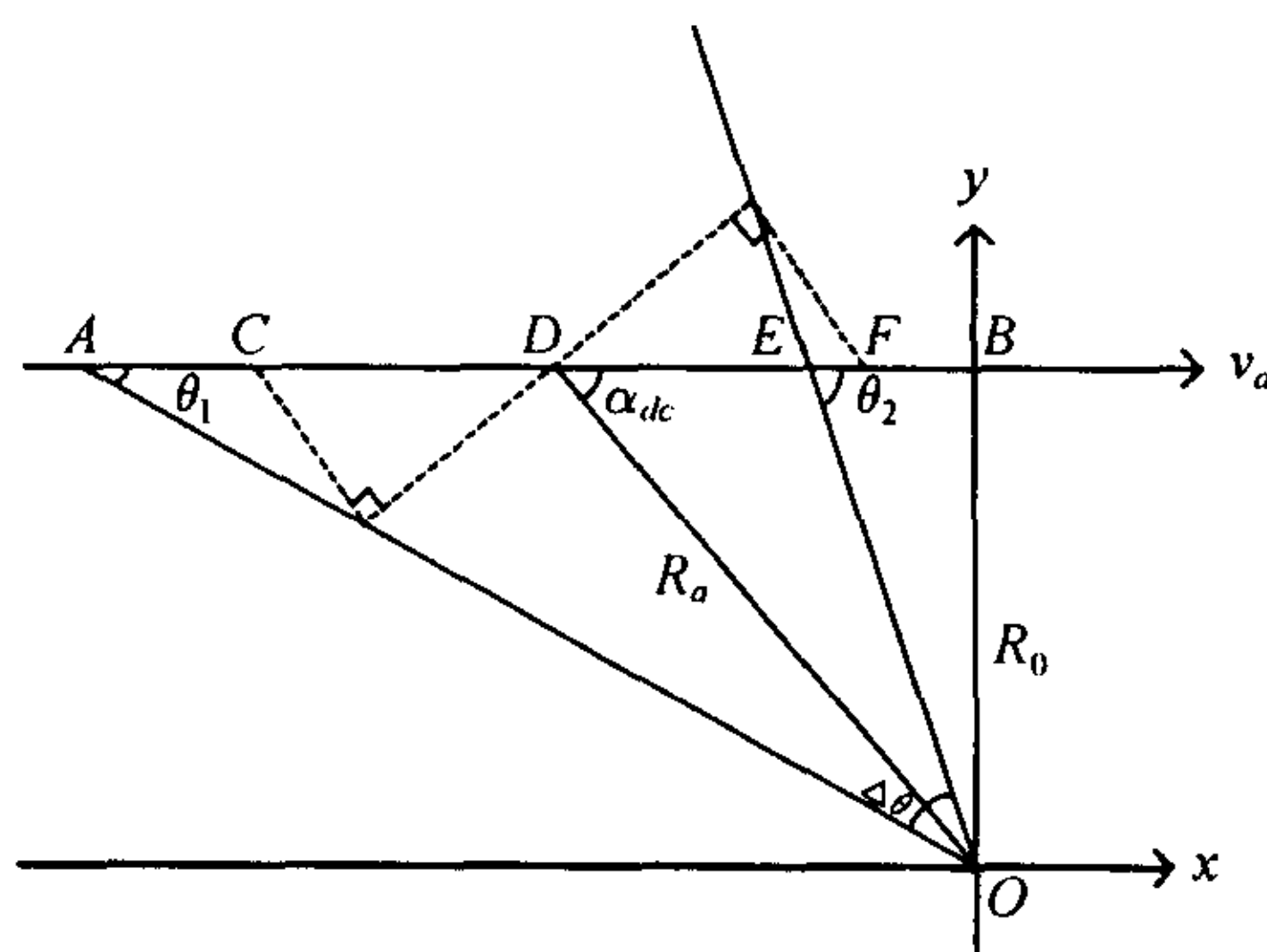


图 1 机载聚束 SAR 斜平面几何示意图

首先根据图 1 几何关系, 合成孔径内得到的回波信号多普勒带宽^[2]:

$$B_d = (2v_a \cos \theta_1 / \lambda_c) - (2v_a \cos \theta_2 / \lambda_c) \quad (2)$$

其中

$$\theta_1 = \alpha_{dc} - \Delta\theta/2 \quad (3)$$

$$\theta_2 = \alpha_{dc} + \Delta\theta/2 \quad (4)$$

将式 (3), (4) 代入式 (2), 得

$$B_d = (4v_a \sin \alpha_{dc} / \lambda_c) \cdot \sin(\Delta\theta/2) \quad (5)$$

一般情况下, $\Delta\theta$ 比较小, $\sin(\Delta\theta/2) \approx \Delta\theta/2$, 因此

$$B_d = (2v_a \sin \alpha_{dc} / \lambda_c) \cdot \Delta\theta \quad (6)$$

根据分辨率要求, 回波信号多普勒带宽应该为^[3]

$$B_d = v_a / \rho_a \quad (7)$$

由式 (6), 式 (7) 可得

$$\Delta\theta = \lambda_c / (2\rho_a \sin \alpha_{dc}) \quad (8)$$

因此, 根据发射信号中心波长、要求的方位分辨率和孔径中心斜视角, 就可以计算出需要的合成孔径角。由正侧视斜距为 R_0 , 得合成孔径长度为

$$L = (R_0/\operatorname{tg}\theta_1) - (R_0/\operatorname{tg}\theta_2) \quad (9)$$

将式 (3), (4) 代入式 (9), 得

$$L = 2R_0 \sin \Delta\theta / (\cos \Delta\theta - \cos 2\alpha_{dc}) \quad (10)$$

利用近似关系 $\cos \Delta\theta \approx 1$, $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$, 并将式 (8) 代入式 (10), 化简得

$$L = \lambda_c R_0 / (2\rho_a \sin^3 \alpha_{dc}) \quad (11)$$

式 (11) 即为普遍适用的机载 SAR 聚束模式合成孔径长度计算公式。表 1 对式 (1) 和式 (11) 的计算结果进行了比较, 选择参数为斜距 $R_0 = 34\text{km}$, 波长 $\lambda_c = 0.032\text{m}$, 方位展宽因子 $K_a = 1$ 。表 1 中传统值由式 (1) 计算得出, 修正值由式 (11) 计算得出。

表 1 机载 SAR 聚束模式合成孔径长度传统值与修正值比较 (km)

孔径中心斜视角 $\alpha_{dc} (^{\circ})$		30	45	60	75	90
$\rho_a = 1.0\text{m}$	传统值	2.1760	1.0880	0.7253	0.5831	0.5440
	修正值	4.3520	1.5387	0.8375	0.6036	0.5440
$\rho_a = 0.5\text{m}$	传统值	4.3520	2.1760	1.4507	1.1661	1.0880
	修正值	8.7040	3.0773	1.6751	1.2073	1.0880
$\rho_a = 0.3\text{m}$	传统值	7.2533	3.6267	2.4178	1.9435	1.8133
	修正值	14.5067	5.1289	2.7918	2.0121	1.8133

从表 1 可以看出, 接近正侧视情况下二者相差不大, 可以用式 (1) 代替式 (11) 作近似计算, 随着斜视角的增加, 误差越来越大, 必需用式 (11) 进行计算。

3 星载聚束 SAR 简化模型合成孔径长度

一般来讲, 星载聚束 SAR 的孔径设计比机载情况要复杂得多, 主要原因是星载条件下卫星椭圆轨道、地球表面曲率和地球自转会带来一系列问题。在一个聚束合成孔径内, 卫星运动的距离相对于斜距比较短, 椭圆轨道在这一段上可近似为一条直线; 成像场景范围相对于地球半径非常小, 可以近似为平面, 因此卫星椭圆轨道和地球表面曲率的问题都可以获得很好的近似, 这里主要研究地球自转对聚束孔径设计的影响。

为了简化问题的分析, 我们采用极地轨道, 地面目标位于赤道, 几何关系如图 2 所示。

图 2 中, 纸面是赤道平面, 卫星轨道垂直穿过纸面向里, 卫星位于 A 点, 目标位于赤道上 T 点, 地球球心在 O 点, 目标速度矢 v_e , 可以分解成斜距向速度分量 v_t 和垂直斜平面的分量 v_z , 地球半径为 R_e , 卫星轨道高度为 H , 正侧视斜距为 R_0 , 视角为 α , 对应地心角为 β , 对应入射角为 γ 。由几何关系可以计算斜距向速度分量为

$$v_t = (R_e + H)\omega_e \sin \alpha \quad (12)$$

其中 ω_e 为地球自转角速度。

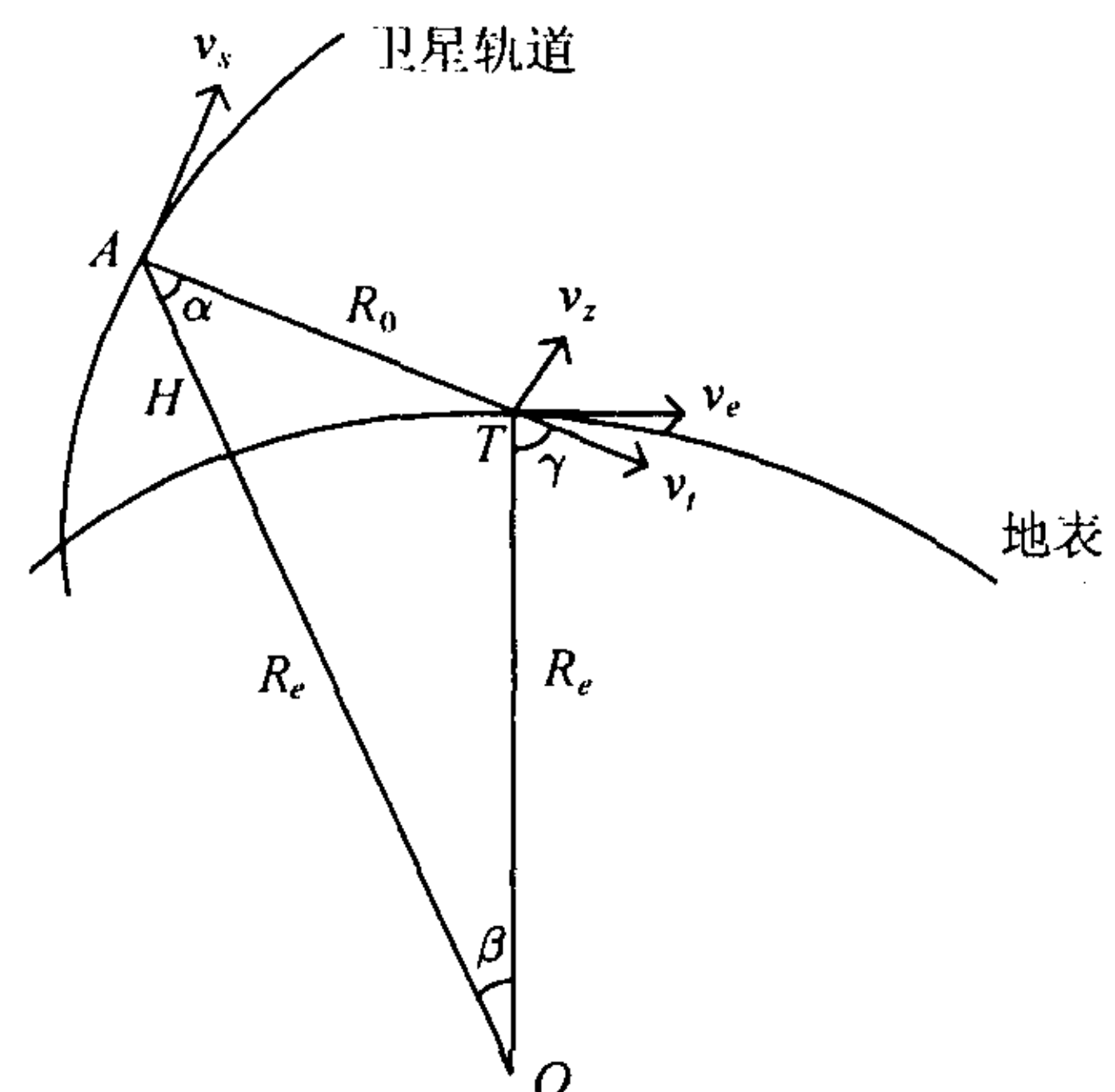


图 2 星载 SAR 距离向剖面图

在一个合成孔径内, 认为 v_t 保持不变, 可以得到图 3 所示的方位向剖面图。在图 3 中, D 点为合成孔径中心, 合成孔径长度为 L , 雷达速度 v_s 沿 y 轴正方向, 目标速度 v_t 沿正 x 轴方向为正, 假设在 $t = 0$ 时刻雷达位于孔径中心 D 点, 目标位于 O 点, 正侧视斜距为 R_0 。在合成孔径时间内, 雷达由 A 点运动到 E 点, 目标由 C 点运动到 F 点, 各点对应斜视角如图所示, 则瞬时多普勒频率^[2]:

$$f_d = 2(v_s \cos \alpha - v_t \sin \alpha) / \lambda_c \quad (13)$$

其中 α 为瞬时斜视角。

令合成孔径端点对应的多普勒频率分别为 f_{da} , f_{de} , 则合成孔径 AE 对应的多普勒信号带宽为

$$B_d = f_{da} - f_{de} \quad (14)$$

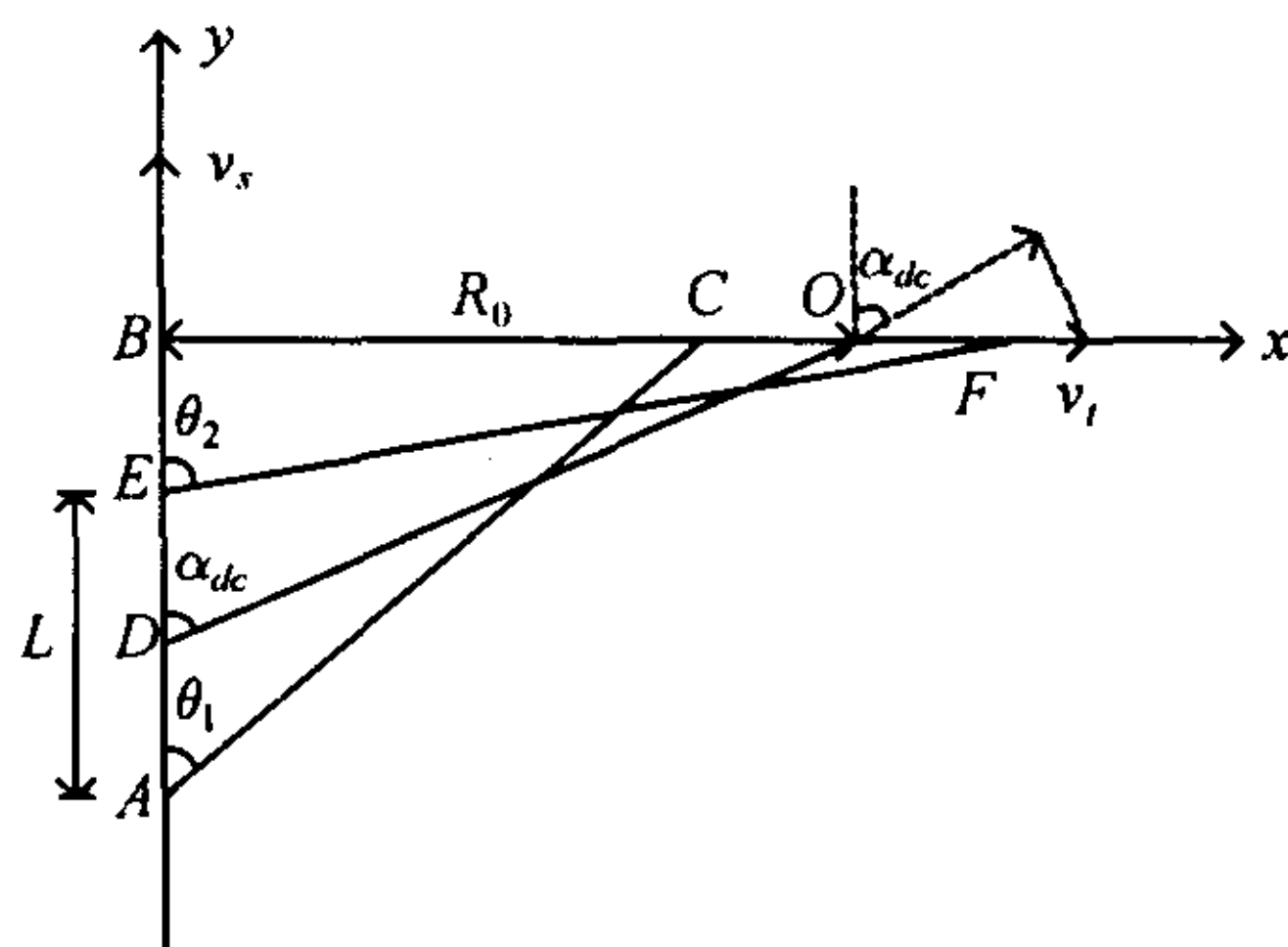


图 3 星载聚束 SAR 方位向剖面图

由式 (3), (4), (13), (14), 得

$$B_d = (4 \sin(\Delta\theta/2) / \lambda_c) (v_s \sin \alpha_{dc} + v_t \cos \alpha_{dc}) \quad (15)$$

根据分辨率要求, 回波信号多普勒带宽应该为^[3]

$$B_d = v_s / \rho_a \quad (16)$$

因此, 由式 (15), (16) 及近似关系 $\sin(\Delta\theta/2) \approx \Delta\theta/2$, 可以得到

$$\Delta\theta = v_s \lambda_c / [2\rho_a (v_s \sin \alpha_{dc} + v_t \cos \alpha_{dc})] \quad (17)$$

设合成孔径时间为 Δt , 则合成孔径长度为

$$L = v_s \Delta t = [(R_0 - v_t \Delta t/2) / (\tan \theta_1)] - [(R_0 + v_t \Delta t/2) / (\tan \theta_2)] \quad (18)$$

由式 (3), (4), (18), 得

$$L = \frac{2v_s R_0 \sin(\Delta\theta)}{v_t \sin(2\alpha_{dc}) + v_s [\cos \Delta\theta - \cos(2\alpha_{dc})]} \quad (19)$$

由于 $\cos \Delta\theta \approx 1$, $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$, 并将式 (17) 代入式 (19), 得

$$L = \frac{\lambda_c R_0 v_s^2}{2\rho_a (v_s \sin(2\alpha_{dc}) + v_t \cos \alpha_{dc})^2 \sin \alpha_{dc}} \quad (20)$$

这就是考虑地速后星载 SAR 聚束模式合成孔径长度的计算公式。当地速为零时, 式 (20) 还原为式 (11)。

4 数值模拟分析

以小卫星合成孔径雷达系统参数为例, 对星载 SAR 聚束模式合成孔径长度用传统方法和改进公式分别进行数值模拟分析。雷达工作在 X 波段, 波长为 $\lambda = 0.03125\text{m}$, 卫星轨道高度为 $H = 492\text{km}$, 地球半径为 $R_e = 6371\text{km}$, 视角为 35° 。

图 4 给出了分别由式 (1), 式 (11) 和式 (20) 计算的不同斜视角下星载聚束 SAR 合成孔径长度曲线, 可以看出, 式 (1) 计算结果与改进值有很大误差, 式 (11) 的结果与式 (20) 接近, 在小斜视角情况下近似相等, 随着斜视角的增加, 差别越来越大, 因此对于星载聚束 SAR 应该采用式 (20) 来计算合成孔径长度。对比图 4(a) 和图 4(b) 可以看出, 方位分辨率要求越高, 误差越大。

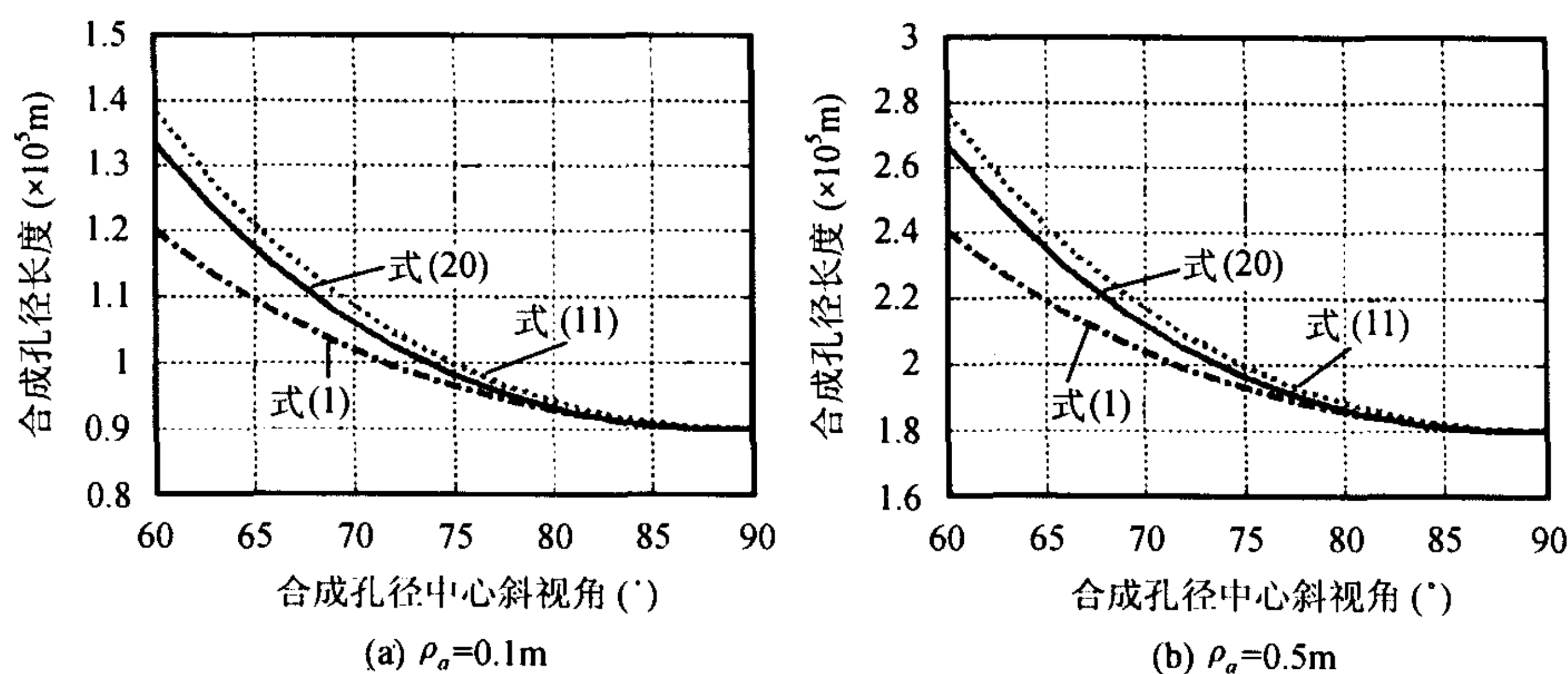


图 4 v_t 为正时星载聚束合成孔径长度曲线图

上面的结果是 v_t 为正的情况下得出的, 当 v_t 为负, 即目标向雷达方向运动时, 结果如图 5 所示。可以看出地速对孔径长度的影响正好相反, 即 v_t 为正时, 式 (20) 计算的孔径长度要比式 (11) 的结果小, v_t 为负时, 式 (20) 计算的孔径长度要比式 (11) 的结果大。这进一步说明了星载孔径设计应当考虑地速带来的影响。

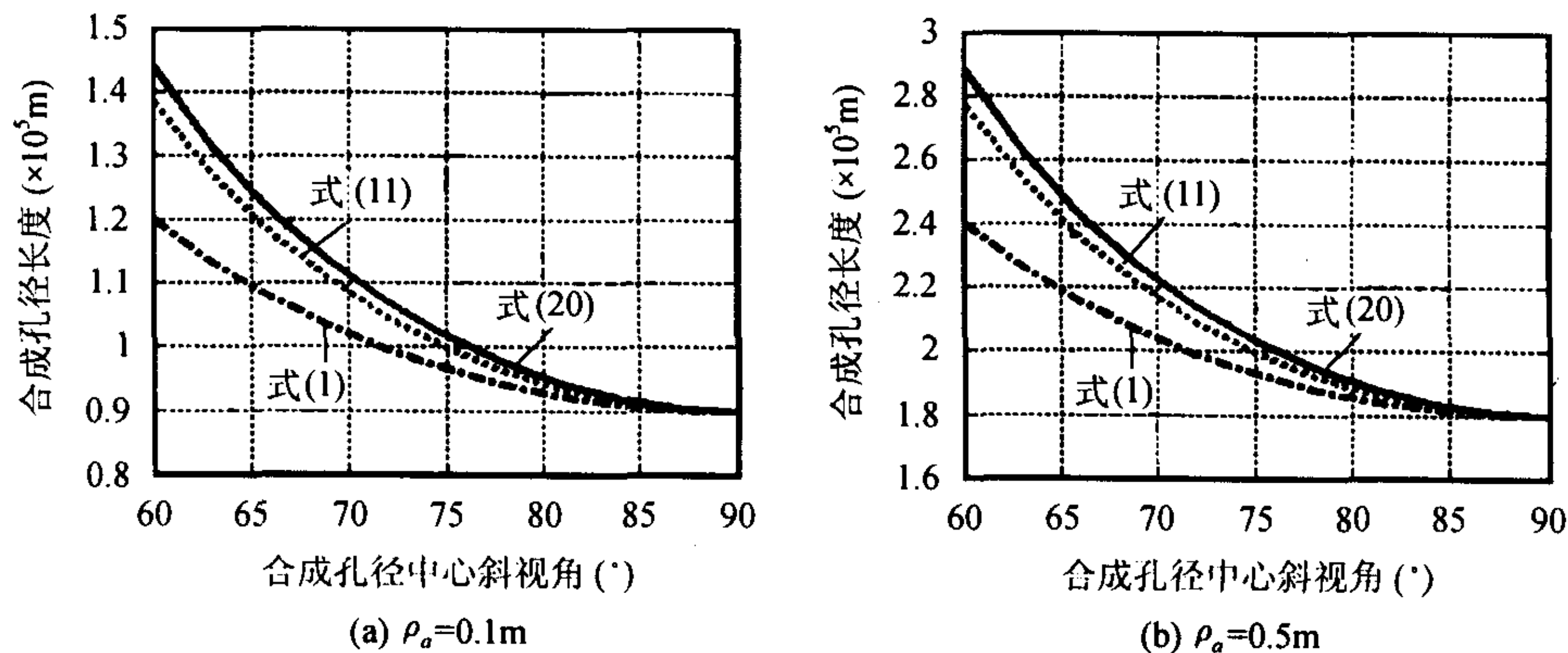


图 5 v_t 为负时星载聚束合成孔径长度曲线图

5 结束语

本文首先给出了传统聚束 SAR 合成孔径长度理论公式并指出了其局限性,然后在机载 SAR 几何模型基础上导出了计算机载聚束 SAR 合成孔径长度的新公式。在星载情况下,本文采用了简化的几何模型,推导出了考虑地速后合成孔径长度的计算公式,最后通过数值模拟分析证实了对传统公式进行校正的必要性。本文的工作对机载和星载 SAR 聚束模式孔径设计有较大的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms. Norwood, MA: Artech House, 1995, Chap. 1, 2.
- [2] 袁孝康. 星载合成孔径雷达回波多普勒频率的计算. 上海航天, 2001, 18(3): 1-4.
- [3] 洪文, 毛士艺. 机载聚束式合成孔径雷达成像技术. 北京: 中国航空科技报告, 1997.

高祥武: 男, 1976 年生, 博士生, 主要研究聚束模式合成孔径雷达系统和信号处理.

雷 宏: 男, 1963 年生, 研究员, 硕士生导师, 一直从事合成孔径雷达领域的研究工作.

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事机载、星载合成孔径雷达系统研究工作.