

多通道 彡波束星载 SAR 实现高分辨 宽测绘带成像综述

赖涛, 董臻, 梁甸农

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要:传统单发单收星载 SAR 受最小天线面积限制, 不能同时实现高分辨率和大测绘带, 采用多通道接收可以有效解决该问题。本文阐述了多种结构的多通道 SAR 系统的实现原理, 分析比较了多种系统在品质因子、数据量、信噪比、信号处理复杂度以及是否存在盲区等方面的优劣和异同, 并给出整体性能评价。这些结论对实际系统设计提供了理论指导和有力支撑, 具有一定的参考价值。

关键词:多通道星载 SAR; 高分辨大测绘带; 性能评价

doi: 10. 3969/ j. issn. 1000- 3177. 2011. 01. 022

中图分类号: TP79, TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000- 3177(2011) 113- 0109- 10

A Summary of HRWS Imaging Performance of Multi-channel Space-borne SAR

LAI Tao, DONG Zhen, LIANG Dianong

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Constrained by minimum antenna area, conventional SISO(single input single output) - SAR fails to achieve a high azimuth resolution and wide swath simultaneously. This problem can be resolved by introducing multiple receiving channels in or cross azimuth direction. In this paper, several multi channel SAR systems are explained in detail and contrasted on the terms of merit factor, data volume, signal noise ratio, complexity of signal processing and blind area. Based on the analysis, some conclusions are drawn to present theoretical guidance to the design of real SAR systems.

Key words: multi channel space borne SAR, high resolution and wide swath, performance evaluation

1 引言

自全球第一颗 SAR 卫星 SeaSAT-A 投入使用以来, 星载 SAR 在民用和军用两个方面取得了长足的进展。其中, 高分辨率和宽测绘带(HRWS: High Resolution and Wide Swath) 图像的获取始终是所有从事星载 SAR 研究的科研人员所追求的两个指标。各国科学家为此作出了不懈的努力, 聚束模式^[1]被提出用于提高分辨率, 却付出了测绘带下降的代价; 扫描模式^[2]可以获得大测绘带, 但分辨率随之降低; 最常应用的条带模式只是两者的一个折衷。究其原因, 可解释为: 为提高分辨率, 则要求天线方

位长度小并且高 PRF 以抑制方位模糊; 为提高测绘带, 则要求天线距离长度小并且低 PRF 以抑制距离模糊。很明显, 为同时实现高分辨和宽测绘带, 要求天线具有小的面积(小的方位长度和小的距离长度)。但是, 采用小面积天线的后果是, 回波将存在严重的距离模糊(系统工作于高 PRF) 或多普勒模糊(低 PRF), 或二者共存(中 PRF)。受“最小天线面积约束”^[37]的限制, 传统意义上的单天线自发自收 SAR 难以同时实现高分辨率和宽测绘带。

针对这一问题, 各国学者提出了很多解决方案。这些解决方案可分为两类: 第一类是采用多个接收通道/波束, 以数字波束形成来抑制模糊^[3-36]; 第二类通

收稿日期: 2010- 01- 11 修订日期: 2010- 03- 04

作者简介: 赖涛(1980~), 男, 主要研究方向为合成孔径雷达多相位中心成像处理, 合成孔径雷达运动补偿方法研究。

E-mail: ltnudt@163.com.

过发射多个波形, 波形之间正交, 信号分离的同时完成模糊抑制。目前, 可以用于 SAR 成像的正交性好的波形尚未得到有效解决, 因此第二类方法并不成熟, 实用性有待商榷。本文侧重于第一类方法的研究。

采用多个接收通道/波束的技术, 最早于上世纪 70 年代提出, 在 80 到 90 年代发展较为缓慢。进入本世纪, 随着天线技术的发展和高分辨宽幅图像的需求, 很多国内外学者开展了对多通道/多波束星载 SAR 的研究, 提出了很多系统实现方案, 如 J. P. Claassen 和 J. Echerman 提出的斜视多波束系统^[4-5], A. Currie 和 M. A. Brown 提出的单相位中心多波束系统^[6]以及天线偏置多相位中心(DPCA) SAR 系统^[6], G. D. Callaghan 和 I. D. Longstaff 提出的四元矩形阵列系统^[7], 以及 M. Suess 提出^[9-10]并由 Gerhard Krieger 和 Alberto Moreira 等人进一步完善^[14-15, 18-20, 35]的距离接收扫描的 DPCA-SAR 系统。

众多的方案到底孰优孰劣, 各有什么特点和适用条件, 目前尚没有文献进行详细论述并给出结论, 本文将就这些问题展开研究。

2 品质因子

系统能获得的测绘带越大, 分辨率越高, 说明系统的 HRWS 成像性能越好, 因此以测绘带和分辨率的比值来衡量系统的性能是非常恰当的, 我们将这个比值称为系统的品质因子(MF: Merit Factor)。不难得到品质因子为^[37]

$$MF \approx \frac{c}{2v} \quad (3)$$

可见, 系统的品质因子只和平台速度有关。机载 SAR 系统由于平台速度低, 品质因子非常大, 基本上不存在测绘带和分辨率之间的矛盾。星载 SAR 平台速度大, 以常见的近地轨道 SAR 为例, 速度约为 7500m/s, 则品质因子约为 20000。以 1m 分辨率的高分辨 SAR 为例, 其斜距测绘带的极限是 20km。考虑距离模糊和方位模糊、加窗、脉宽和发射窗的余量, 实际系统的品质因子约为 10000, 即斜距测绘带约为 10km。可见单天线单发单收由于受“最小天线面积约束”的限制, 难以同时实现高分辨宽测绘带。

提高系统的 HRWS 成像能力可以从以下方面着手, 降低 PRF 以获得更大的测绘带或提高 PRF 以获得更高的方位分辨率。但是降低 PRF 会引起方位模糊, 而提高 PRF 会导致距离模糊, 因此需要

采取消除距离/方位模糊的措施。引入多通道接收的方法可以解决测绘带和分辨率之间的矛盾, 使得大测绘带和高分辨率得以在一个系统中同时实现。

3 多种结构的多通道系统原理分析和性能评价

多个接收通道/波束消除距离多普勒模糊, 可以解决宽测绘带和高分辨率之间的矛盾, 使二者兼得。下文对目前国内外学者提出的各种多通道/波束构型进行原理阐述和性能分析, 并以品质因子的改善程度作为评价某个系统获得 HRWS 成像能力的重要指标。

3.1 斜视多波束 SAR 系统

该多波束系统最早由 J. P. Claassen 和 J. Echerman 于 1978 年提出^[4], 而后由 B. R. Jean 和 J. W. Rouse 予以发展和完善^[5]。该多波束系统的初衷为解决传统条带式 SAR 和 SCANSAR 中分辨率和测绘带的矛盾, 以同时获得近似条带式 SAR 的分辨率和 SCANSAR 的测绘带。

不同于常规条带式 SAR, 该系统的天线长度向与卫星速度之间有一个较大夹角, 为大斜视观测几何。为表示与正侧视 SAR 的区别, 将天线的长度向定义为方位向。该系统的基本概念为, 利用高度向宽天线和长度向窄天线形成俯仰向窄、方位向宽的波束。系统工作于大斜视角以获得大测绘带, 不过回波存在严重的多普勒模糊。长度向多个接收阵元接收, 采用模拟波束形成以获取多个窄方位子波束, 子波束在地面的足迹在俯仰向和方位向都具有很小的范围, 覆盖范围内不存在距离多普勒模糊, 将这些不模糊的区域分别进行成像并将各子图像拼接起来, 可以获得连续的宽测绘带图像。需要说明的是, 不同子波束的回波近似同时到达接收天线, 回波的接收窗长度由子波束的俯仰宽度确定, 通常采用相对小的俯仰波束角宽度, 以使得系统可以采用相当高的 PRF 而不会导致距离模糊。高 PRF 的应用可以保证高方位分辨率。

将大斜视 SAR 与正侧视 SAR 作一比较。正侧视 SAR 采用小方位角、大俯仰角获得高分辨大测绘带, 如果 PRF 满足方位无模糊的话, 系统将存在严重的距离模糊。而大斜视 SAR 采用大方位角, 小俯仰角, 虽然可以获得无距离模糊的大测绘带, 却导致了严重的方位模糊, 可见大斜视 SAR 实际上是一种特殊的照射几何, 将距离模糊转化为了方位模糊, 本质上没有克服最小天线面积的限制。

除此之外,大斜视 SAR 的特殊照射几何导致了在信号处理上比正侧视 SAR 要复杂得多。方位大波束角与大斜视形成的地面扇形覆盖,使得各目标到天线距离相等(数据在时域重叠)却处于不同测绘带,因此距离迁徙曲线形状各不相同(交叉于某一点而斜率各异),难以完成距离迁徙。要解决这个问题,通常要求采用窄的方位波束,使得在波束照射范围内,目标的距离迁徙曲线的差异非常微弱,以致可以统一作距离迁徙校正。如此一来,要求系统采用很窄的方位子波束,需要采用更多的方位通道,使得这种大斜视模式的实用性大大下降。

斜视多波束 SAR 还存在一个严重缺陷,即能量利用率很低。接收窗由回波最近-最远斜距历时差和脉宽两部分组成,其中历时差为有效部分,而脉宽部分会在距离脉压后被舍弃,传统 SAR 历时差部分远大于脉宽,因此,回波的大部分被保留下来用于后续成像处理。而斜视多波束概念系统以短历时差换取高 PRF 来抑制方位模糊,其历时差相比星载 SAR 发射信号常用脉宽可比拟,甚至小于脉宽。这说明,回波一半以上将被舍弃,系统的能量利用率低于 50%。对于目前的星载 SAR 来说,功率依然是一个性能瓶颈,如此低的功率利用率将进一步减少 SAR 系统的可持续工作时间。

3.2 单相位中心多波束系统

单相位中心多波束 (SPCMB: Single Phase Center Multiple Beams) 系统按波束排列方向可分为两种:一种为单相位中心方位多波束;一种为单相位中心距离多波束,下面分别对两种模式进行分析。

3.2.1 单相位中心方位多波束系统

单相位中心方位多波束系统的基本原理为:采用低 PRF 在方位向和俯仰向均发射宽波束获得无距离模糊的大测绘带,但存在多普勒模糊;利用多个方位向阵元接收,在接收端采用模拟波束形成以形成多个子波束,每个子波束占据全孔径的一部分,子波束的多普勒带宽小于 PRF,消除了方位模糊。通过综合处理多个子波束的数据,可以获得高方位分辨率。

理论上,相比宽波束单发单收系统,单相位中心多波束系统的 PRF 可以在降低子波束个数倍后,仍然保证回波不存在主瓣多普勒模糊,从而测绘带可以提高波束个数倍,也即系统的品质因子可以改善子波束个数倍。然而,实际系统成像处理要求回波具有很好的模糊比,通常要求达到 -20dB 以下^[1]。那么单相位中心多波束系统的模糊比性能到底如何,系统的品质因子改善能否达到波束个数? 答案

是否定的,分析如下。

以图 1 三波束系统为例,设发射宽波束的天线长 2m 以达到 1m 的方位分辨率,接收天线长 6m ,多阵元接收,并通过三组加权形成三个相邻子波束刚好覆盖发射宽波束在地面的足迹。设卫星速度为 7500m/s ,则对于宽波束单发单收系统, 7500Hz 的 PRF 可以保证无主瓣内方位模糊,而三波束系统对于每一个子波束而言, 2500Hz 的 PRF 可以保证无主瓣内方位模糊。实际上为了达到满足成像性能要求的方位模糊比^[1],要求 PRF 大于主瓣方位带宽。图 2 示出了宽波束单发单收系统回波的方位模糊比随 PRF 的变化曲线,该模式下的方位模糊比要优于 -20dB , PRF 必须大于 8653Hz ,也即方位过采样率必须大于约 1.15。图 3 和图 4 分别给出了宽波束发射/窄波束接收模式(对于每个子波束而言方位分辨率为 3m)中间波束和两侧波束的回波的方位模糊比。可以发现,中间波束的方位模糊比要优于两侧波束,原因在于两侧波束受到发射宽波束下降区的加权,导致主瓣下降过多,继而引起模糊比恶化。为保证 -20dB 的方位模糊比,中间波束要求 PRF 为 4981Hz ,两侧波束要求 5527Hz (两侧波束完全对称),要求过采样率分别约为 2.0 和 2.2,高于单发单收的 1.15。

单相位中心三波束系统在完成波束综合后(以实现 1m 分辨率),回波方位模糊比示于图 5。可以发现,波束综合后回波的方位模糊比优于两侧子波束而劣于中间子波束。在方位模糊比为 -20dB 处,要求 PRF 为 5230Hz ,过采样率约 2.1。

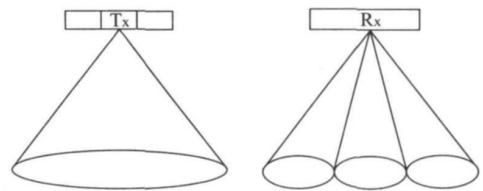


图 1 宽发窄收三波束系统

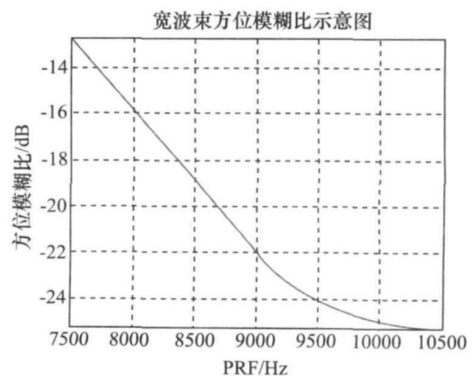


图 2 宽波束单发单收方位模糊比

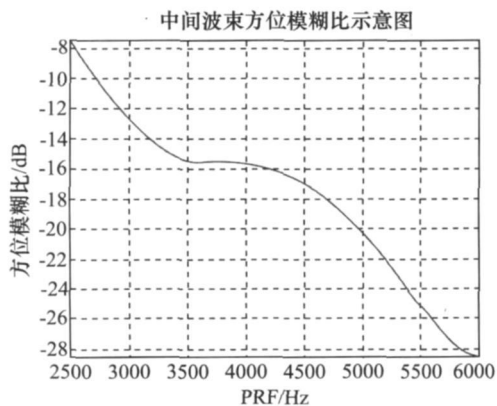


图3 中间子波束方位模糊比

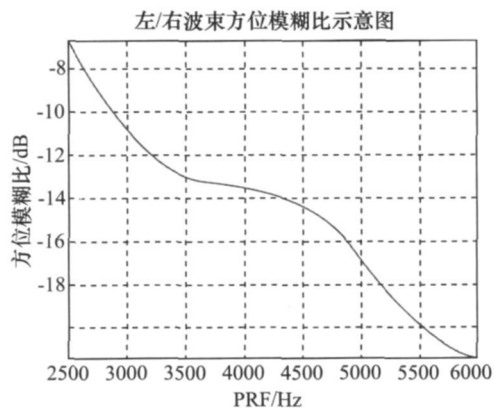


图4 两侧子波束方位模糊比

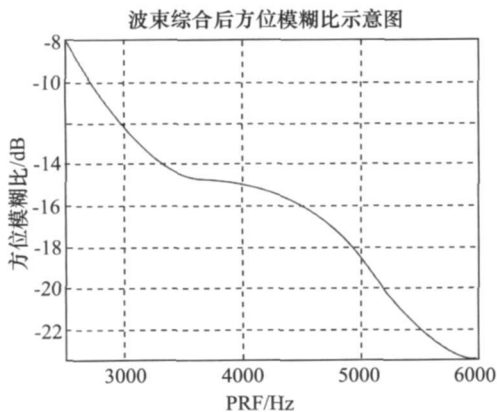


图5 波束综合后方位模糊比

单相位中心三波束系统的品质因子改善了 $8653/5230 \approx 1.65$ 倍, 没有达到子波束数 3; 我们还计算了五波束系统的品质因子, 大概改善了 2.05 倍, 其性价比还略差于三波束系统。究其原因, 主要是发射宽波束对接收子波束的加权, 降低了子波束的模糊比性能, 进而导致波束综合后方位模糊比性能不佳。鉴于此, A. Currie 提出采用子波束发射/子波束接收的“窄发窄收”模式^[6], 这种模式避开了“宽发窄收”模式中宽波束的不利加权。在发射信号完全正交的情况下, 可消除子波束之间的相互模糊,

其系统品质因子的改善有望达到子波束个数倍。然而, 目前可以用于 SAR 成像的正交信号尚未有效解决, 各子波束回波之间将存在严重的相互模糊, 因此, “窄发窄收”模式更多是具有理论意义而难以实际应用。

3.2.2 单相位中心距离多波束系统

单相位中心距离多波束系统的基本原理为, 采用高 PRF 保证方位不模糊并保证高方位分辨率, 距离向用子天线发射宽波束覆盖大测绘带, 但是此时存在主瓣距离模糊。距离向采用全天线长度接收, 通过对回波进行多组加权以形成多个不同指向的子波束, 分别覆盖多个子测绘带。采用足够多的子测绘带个数, 使得即使工作于高 PRF 子测绘带内也不存在主瓣距离模糊, 多子测绘带拼接实现无模糊的宽测绘带。

如图 6 以三波束系统为例, 宽波束发射, 三个子波束毗邻相接覆盖整个宽波束在地面的足迹, 三个子波束对应三个接收通道。要得到三波束系统对品质因子的改善效果, 需对距离模糊比进行评估对比。

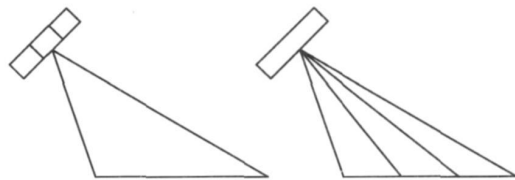


图6 单相位中心距离三波束系统

我们来考查回波的模糊特性, 以三波束系统为例, 设卫星高度 500km, 波束中心下视角 45° , 发射波束宽 6° 以获取 105km 的测绘带, 不考虑脉宽的影响, 则 PRF 的上限为 2015Hz。若要求距离模糊比 (RASR: Range Ambiguity Signal Ratio) 为 -20dB, 如图 7 所示, 要求 PRF 为 1750Hz。在 -20dB 的 RASR 要求下, 参见图 8、图 9 和图 10, 中间波束, 近端波束和远端波束(与方位波束系统不同, 近端波束和远端波束并非完全对称, 因此性能稍有差异)对 PRF 的要求分别为小于 3053Hz、2649Hz 和 2658Hz。由于 3 个波束的回波是独立处理的, 因此应该以三者中最小值为对系统 PRF 的要求, 即系统 PRF 必须小于 2649Hz。此时, 可得系统品质因子改善了 $2649/1750 \approx 1.51$ 倍。可见, 与方位多波束系统类似, 距离多波束系统的品质因子改善倍数也远不能达到波束个数。原因为子波束距离天线方向图受到发射宽波束天线方向图的加权后, 距离模糊性能下降。

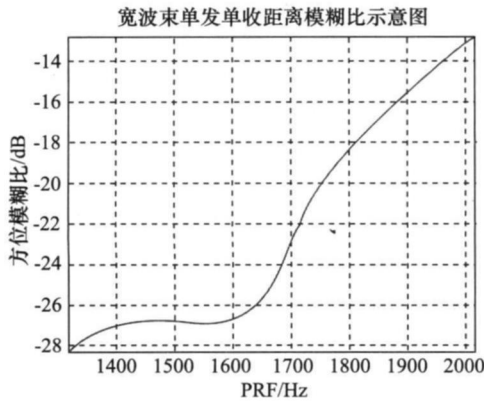


图7 宽波束单发单收距离模糊比

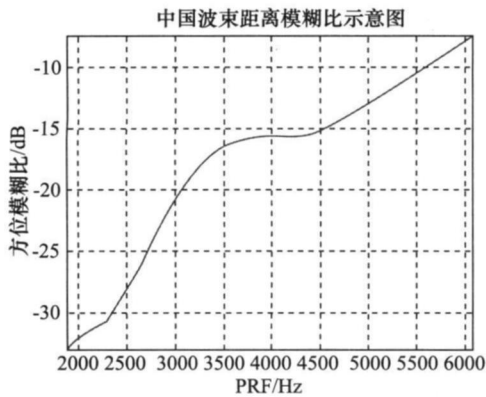


图8 宽发窄收中间波束距离模糊比

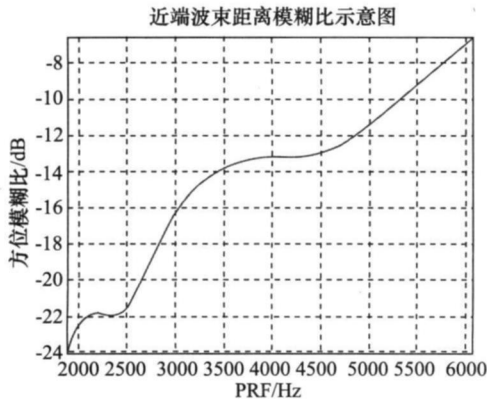


图9 宽发窄收近端波束距离模糊比

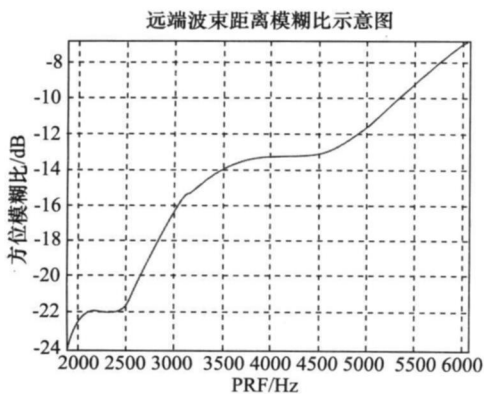


图10 宽发窄收远端波束距离模糊比

3.2.3 单相位中心多波束系统性能总结

据上分析,可以得出以下结论:不论是方位多波束系统,还是距离多波束系统,其品质因子的改善都远达不到子波束个数,约为波束个数的一半或更低,而随着波束个数的增加,其性价比还将进一步降低。此外,单相位中心距离多波束系统由于工作在高PRF条件下,测绘带并不是连续的,而是存在多个盲区。为避免这种情况,可以采用收发天线分置,代价是增加了系统成本。

3.3 天线偏置多相位中心(DPCA) SAR系统

单相位中心多波束系统存在诸多理论和实现问题,因此,一种被称为天线偏置多相位中心的概念被提出^[6]。该系统的基本原理为,采用子天线以低PRF发射宽波束以获得高分辨率和大测绘带,空间位置不同的多个方位向子天线(与发射天线大小相同)同时接收,等价提高方位向的空间采样率。各子天线回波经过相位补偿并根据空间位置依次排列,则可以等同于一个天线以 $N \cdot PRF$ (设子天线个数为 N)自发自收工作,消除方位模糊。

DPCA-SAR系统发射和接收波束相同,各波束之间不存在相互模糊,因此回波的方位模糊特性等同于单天线以三倍PRF单发单收系统的方位模糊特性。这有别于单相位中心多波束系统中,接收子波束受到发射宽波束的不利加权而导致方位模糊比增加。也就是说,天线偏置三相中心SAR系统的品质因子近似等于接收相位中心数。

以一发三收为例,图11示出了一发三收的天线偏置相位中心SAR系统,设发射天线长2m以获得1m分辨率,卫星速度7500m/s,则多普勒带宽为7500Hz。很明显,单个相位中心的回波的方位模糊比如图12所示,可见,当系统PRF小于方位带宽时,回波存在严重的主瓣模糊,因此其方位模糊比非常高。图13给出了三个相位中心回波经过相位补偿和依次排列,构成新的回波后的方位模糊比,在PRF为2886Hz时方位模糊比可降到-20dB,根据图2,单发单收宽波束PRF为8653时方位模糊比为-20dB,因此,品质因子改善了 $8653/2886 \approx 3$ 倍,达到了相位中心个数。

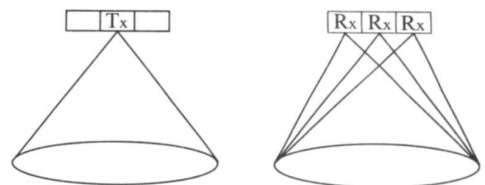


图11 一发三收天线偏置多相位中心系统

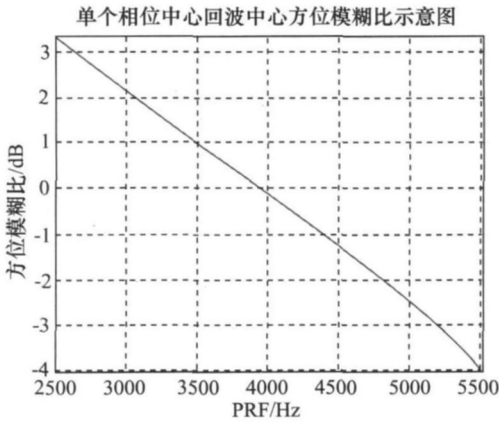


图 12 单个相位中心回波方位模糊比

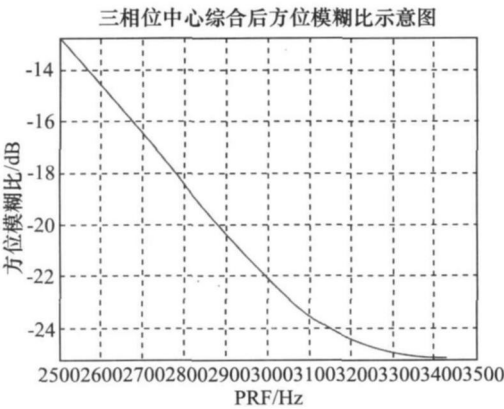


图 13 解方位模糊后回波方位模糊比

3.4 四元矩形阵列系统

四元矩形阵列系统于 1999 年由 G. D. Callaghan 和 I. D. Longstaff 提出^[7]，是天线偏置多相位中心系统的一个扩展，即其在方位向和俯仰向分别采用两个接收子天线，总共 4 个接收子天线。其中，方位向的两个接收子天线用于解方位模糊，可以降低系统 PRF 从而增加测绘带；距离向的两个子天线用于解距离模糊，可以进一步增加测绘带。由于方位向和距离向的多个子天线都能有效增加系统的测绘带，因此距离向的多子天线可以代替方位向的多子天线，从而降低对天线方位向长度的要求，使得天线长宽比更合理，更易安装在小型卫星上。

四元矩形阵列系统采用一发四收，其收发子天线分布如图 14 所示。设保证子天线单发单收回波无方位模糊的脉冲重复频率为 PRF，则方位向两个接收相位中心可使 PRF 降低到 1/2，则测绘带可以增加一倍；距离向两个接收相位中心可消除两个子测绘带回波存在的主瓣距离模糊，从而测绘带可再增加一倍。因此四元阵列系统的测绘带相比子天线，提升到四倍。

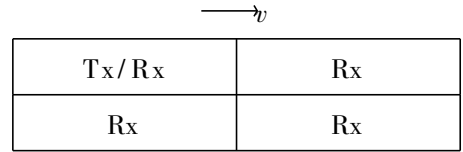


图 14 四元矩形阵列收发子天线分布

四元阵列系统的方位向解模糊可参考 DPCA-SAR 系统，我们主要讨论距离向两个相位中心解距离模糊的能力。我们在 3.3.2 中分析了单相位中心多距离波束系统的距离模糊比特性，发现其解距离模糊性能不佳，原因是子波束受到发射宽波束的加权，导致主瓣展宽，从而距离模糊比恶化，系统的品质因子改善不能达到波束个数。实际上，测绘带上每个点的模糊特性各不相同，应该采用不同的加权因子提取目标信号并抑制模糊信号。然而，单相位中心多波束系统每个接收单元采用的是固定加权形成固定波束，因此这种事前加权模式不能达到最优的信号提取和模糊抑制。

有别于单相位中心距离多波束系统，四元矩形阵列系统距离上采用两个接收相位中心的模式，两个子天线的接收功率方向图一样，形成两路回波。形成两路独立回波的好处是，针对每一个测绘位置的信号，可以设计最优加权，形成加权波束，使波束峰值对准目标信号，而零点对准主瓣内模糊信号，从而最大程度的抑制模糊。随目标位置变化的最优加权，优于单相位中心多波束系统的模拟波束形成的固定加权，其模糊抑制性能有很大改善。

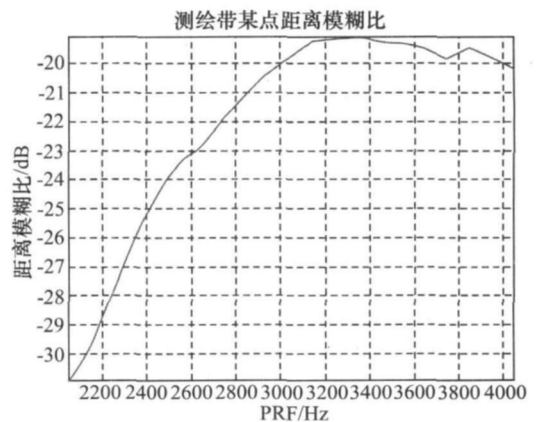


图 15 两接收通道回波距离模糊比

以距离向两个接收子天线为例，设卫星高度 500km，波束中心下视角 45°，发射波束宽 6° 以获取 105km 的测绘带，采用两个接收子天线解距离模糊，子测绘带不模糊对应的最大 PRF 为 4063Hz (忽略脉宽的影响)。采用距离最优加权，距离模糊比改善非常明显，如图 15 给出了距离模糊比随 PRF 的

变化曲线, 可见在 PRF 最大值处, 回波的距离模糊已经小于 -20dB , 因此系统的品质因子改善度非常优秀, 达到了接收子天线数。

3.5 距离多子天线扫描接收的 DPCA-SAR 系统

为实现高分辨大测绘带成像, 需采用小长度(高分辨)和小高度(大测绘带)发射天线, 相比传统 SAR 的大天线发射大天线接收, 小天线一发多收模式用于发射和接收的天线面积都要小得多, 因此其回波的信噪比非常低, 很难满足获取高质量图像的要求。

鉴于此, 距离多接收的 DPCA-SAR 系统于 2001 年由德国的 M. Suess 提出以缓解回波信噪比过低的问题。与四元矩形阵列模式不同的是, 方位向采用足够多的子天线, 以使系统工作于低 PRF, 从而保证无距离模糊的宽测绘带。距离向多子天线接收不是用来解距离模糊, 而是用来做相干叠加以改善回波信噪比。换句话说, 距离向采用多个子天线接收, 可以增加总的接收天线面积, 提高天线增益。

测绘带内每个目标的回波进行相干叠加的过程可以这样理解: 由于测绘带回波从近端到远端依次进入接收窗, 则利用距离向多个接收单元, 可进行实时波束形成, 形成一个高增益的窄波束, 波束中心从近到远扫描, 跟踪每一个测绘位置的回波。因此这种模式又被称为接收扫描(SCORE: Scan On Receive)。距离扫描接收 DPCA-SAR 系统的收发天线分布可参考图 16, 其中一个小天线发射, 方位和距离多个子天线接收。由于距离向的多接收子天线只是用于提高天线增益, 即系统不存在主瓣内距离模糊, 因此系统的模糊抑制性能与 DPCA-SAR 系统的模糊抑制性能类似, 可参考 3.3。

T _x /R _x	R _x	R _x	R _x	R _x
R _x	R _x	R _x	R _x	R _x
R _x	R _x	R _x	R _x	R _x
R _x	R _x	R _x	R _x	R _x
R _x	R _x	R _x	R _x	R _x

图 16 距离接收扫描的 DPCA-SAR 系统的天线分布

4 各概念系统性能比较和结论分析

前面 5 个小节对现有的多天线/多通道接收 SAR 系统实现 HRWS 成像的原理、信号处理、模糊抑制性能以及品质因子进行了简明扼要的阐述和深入分析, 本节将其归纳总结如下。

斜视多波束系统其特殊的波束形状和照射几何, 虽然使得系统 PRF 可以非常高, 但是仍然存在严重的方位模糊, 需要采用多个方位接收子天线来消除模糊。而其特殊的照射几何使得其信号处理非常复杂, 距离迁徙曲线的相互分离和校正需要更多的通道数来形成更窄的方位波束, 进一步增加了系统的复杂度。该系统还存在斜视角选取在测绘带和分辨率之间的矛盾, 能量利用率过低也使得其实用性大打折扣。

单相位中心多波束系统(包括方位多波束和距离多波束两种)的发射宽波束会对接收窄波束加权使得主瓣展宽, 旁瓣抬高, 因此其模糊信号比较高, 导致必须提高(方位多波束)或降低(距离多波束) PRF 来抑制模糊信号。如此则系统的品质因子比较低, 远不能达到系统采用的子波束数, 因此其性价比比较低。斜视多波束系统也属于这一类, 品质因子性能类似。

DPCA-SAR 系统由于采用事后的数字波束形成处理, 测绘带内每一个目标都可以得到最优加权, 进行信号提取和模糊抑制, 因此其模糊信号比非常低, 使得系统的品质因子改善量近似为子天线个数。与单相位中心多波束系统作一个比较可能会更有助于理解该问题的本质。就单相位中心多波束系统而言, 其测绘带内的目标不是最优加权, 而是每个子波束内的目标进行了统一加权, 即整个测绘带内的目标只有 N (N 为波束个数) 组加权系数, 因此其性能低于 DPCA-SAR 系统的最优加权(对每个距离单元都进行不同加权)。

四元矩形阵列系统(实际可以扩展到多元矩形阵列)采用事后数字波束形成, 因此其品质因子与 DPCA-SAR 系统相当。然而, 距离向的多个子天线接收导致测绘带出现盲区, 这是这种模式最大的不足, 降低了其实用性。

距离多天线接收扫描 DPCA-SAR 系统的多普勒模糊特性与距离单天线接收的 DPCA-SAR 系统相同, 区别是首先必须将距离向信号先进行相干累积, 然后进行方位解模糊。该系统的优点是其信噪比优于前面提到的所有系统, 缺点是必须进行实时波束形成, 系统成本提高。

表 1 比较了 6 种多通道 SAR 系统在品质因子、数据量、信噪比、信号处理复杂度、是否导致盲区以及整体性能 6 个指标的优劣。

就品质因子而言, 单相位中心的系统(表中前三种)要明显劣于多相位中心系统, 即事前加权(模拟波束形成)的性能不如事后加权(数字波束形成)。

表 1 几种多通道 SAR 系统性能比较

系统类型	系统性能 品质因子	数据量	信噪比	信号处理 复杂度	是否存在 盲区	整体性能 评价	备注
斜视多波束系统	低	中	低	非常复杂	否	很差	功率利用率低; 要求通道数偏多
单相位中心方位多波束系统	低	中	低	简单	否	差	合成谱幅度衔接度会影响方位脉冲响应
单相位中心距离多波束系统	低	中	低	简单	是	差	会产生距离扇贝效应
DPCA-SAR 系统	高	中	低	一般	否	中	性能随采样非均匀度变化
四元矩形阵列系统	高	中	低	较复杂	是	较差	测绘带边缘的目标模糊抑制稍差
距离接收扫描的 DPCA-SAR 系统	高	中	中	较复杂	否	好	对星上实时处理器要求很高

表中的“数据量”是指经过一些初步处理后存储在卫星上的数据量,这里说明 4 点。①对大测绘带的追求导致测绘范围大为增加,因此相比传统 SAR 来说,其数据量要大得多,假设分辨率为传统 SAR 的 $1/N$,测绘带为 M 倍,则数据量增加为 $M \cdot N$ 倍。②斜视多波束系统由于要求波束数非常多,但其 PRF 可以相应下降,因此每个子波束对应的通道数据下降,总的的数据量不变。③两种单相位中心多波束系统的数据量是相当的,方位多波束系统低 PRF 而宽数据窗,距离多波束系统高 PRF 而窄数据窗,因此其总的的数据量是一样的。④距离多子天线接收 DPCA-SAR 系统相比 DPCA-SAR 系统,距离上采用多个数据通道,其数据量大大增加,但其在存储前进行相干累积,数据量又降为一个通道的数据量,因此其数据存储量相当于 DPCA-SAR 系统。

表中的“信噪比”是与传统 SAR 进行比较的。传统 SAR 因为采用大天线发射,大天线接收,因此其信噪比可以得到保证。而高分辨大测绘带 SAR 采用小天线发射,多个子天线接收(或方位向或距离向),其发射面积和接收面积都不如传统 SAR,如发射功率一定,其信噪比是非常低的。距离扫描接收的 DPCA-SAR 系统为克服信噪比低的问题,在方位向采用多个接收子天线并进行信号相干累加以提高信噪比,理论上,只要距离上有足够的子天线,其信噪比可以达到传统 SAR 的水平。

就“信号处理复杂度”而言,斜视多波束系统由于特殊的照射几何,其信号处理非常复杂。单相位中心多波束系统由于在事前已经完成波束形成,因此其信号处理相对比较简单。DPCA-SAR 系统需要对回波进行消除多普勒模糊操作,信号处理难度

一般。四元矩形阵列系统的方位和距离都需要进行模糊消除,因此其信号处理要相比 DPCA-SAR 要复杂一些。距离接收扫描的 DPCA-SAR 系统的信号处理难度主要体现在板载的信号相干累加处理上,后续信号处理与 DPCA-SAR 类似。

对于“是否存在盲区”一项,是以收发天线共用为前提的,若收发分置,则不存在盲区的问题。很显然,不管是单相位中心还是多相位中心,只要采用距离解模糊的方式来提高测绘带,就会存在盲区。

综合前面几项性能,可以得出这 6 种多通道系统的“整体性能评价”,斜视多波束系统由于存在问题过多,不适合实际应用。而单相位中心由于其品质因子比较低,即性价比不好,也被排除在外。四元阵列系统由于存在盲区,并且信噪比也很低,因此其性能也是差强人意。DPCA-SAR 系统的各项性能均较为突出,但是信噪比难以满足实际系统要求,而扫描接收的 DPCA-SAR 系统通过距离多接收提高了信噪比,其他各项性能类似于 DPCA-SAR 系统,是最具有实际应用前景的。

5 结束语

本文研究了多通道 SAR 实现高分辨大测绘带成像的技术。首先给出了用于评价多通道 SAR 高分辨大测绘带成像能力的准则,即品质因子。而后在广泛调研文献的基础上,非常全面地分析和论证了已有多通道 SAR 系统的特点和缺陷,根据品质因子、信噪比、数据量,信号处理复杂度等准则,评价了各系统的高分辨宽测绘带成像性能,得出结论为距离接收扫描的 DPCA-SAR 系统是目前综合性能最好、最具竞争力的实现方案。另外,首次由本文给出

了一些有用的结论,如,得出了斜视多波束 SAR 的能量利用率低的结论;给出了单相位中心多波束 SAR 性能不如多相位中心多波束 SAR 的根本原因

为波束覆盖内所有目标统一加权不如逐个目标最优加权,或者事前模拟波束形成不如事后数字波束形成。

参考文献

- [1] W. Carrara, R. Goodman, R. M ajewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithm[M]. Boston: Artech House, 1995.
- [2] R. K. Moore, J. P. Claassen, Lin Y H. Scanning spaceborne synthetic aperture radar with integrated radiometer[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 1981(AES- 17) : 410- 421.
- [3] J. Curlander, R. McDonough. Synthetic Aperture Radar—System and Signal Processing[M]. New York: Wiley, 1991.
- [4] J. P. Claassen, J. Echerman. A system for wide swath constant incident angle coverage[C]// Proceedings of Synthetic Aperture Radar Technology Conference, Las Cruces, NM , 1978.
- [5] B. R. Jean, J. W. Rouse. A multiple beam synthetic aperture radar design concept for geoscience application[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1983(GRS- 21) : 201- 207.
- [6] A. Currie, M. A. Brown. Wide swath SAR[J]. IEE Proc. Inst. Elect. Eng. F. , 1992, 139(2) : 122- 135.
- [7] G. D. Callaghan, I. D. Longstaff. Wide swath spaceborne SAR using a quad element array[C]// IEE Proceedings—Radar Sonar and Navigation. 1992, 139(2) : 122- 135.
- [8] M. Younis, W. Wiesbech. SAR with digital beamforming on receive only[C]// IGARSS, 1999(3) : 1773- 1775.
- [9] M. Suess, B. Grafmuller, R. Zahn. A novel high resolution, wide swath SAR system[C]// IGARSS, 2001: 1013- 1015.
- [10] M. Suess, M. Zubler, R. Zahn. Performanc investigation on the high resolution, wide swath SAR system[C]// EUSAR, 2002: 187- 191.
- [11] N. Goodman, D. Rajakrishna, J. Stiles. 1999: Wide swath, high resolution SAR using multiple receive apertures[C]// IGARSS, 1999: 1767- 1769.
- [12] N. Goodman, Lin S, D. Rajakrishna, J. Stiles. Processing of multiple receiver spaceborne arrays for wide area SAR[J]. IEEE Trans on GRS, 2002, 40(4) : 841- 852.
- [13] G. Krieger, A. Moreira. Potentials of digital beamforming in bi and multistatic SAR[C]// IGARSS. 2003: 527- 529.
- [14] C. Heer, F. Soualle, R. Zahn, R. Reber. Investigations on a new high resolution wide swath SAR concept[C]// IGARSS, 2003: 521- 523.
- [15] M. Younis, C. Fischer and W. Wiesbeck, Digital beamforming in SAR systems[J]. IEEE Trans on GRS, 2003, 41(7) : 1735- 1739.
- [16] J. Mittermayer, H. Runge. Conceptual studies for exploiting the TerraSAR X dual receiving antenna[C]// IGARSS, 2003: 2140- 2142.
- [17] J. P. Aguttes. The SAR train concept: Required antenna area distributed over N smaller satellites, increase of performance by N[C]// IGARSS, 2003: 542- 544.
- [18] G. Krieger, N. Gebert, A. Moreira. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. IEEE GRS letters, 2004(1) : 260- 264.
- [19] G. Krieger, N. Gebert, A. Moreira. SAR signal reconstruction from non uniform displaced phase center sampling[C]// IGARSS, 2004.
- [20] G. Krieger, N. Gebert, A. Moreira. Digital beamforming and non uniform displaced phase center sampling in bi and multistatic SAR[C]// EUSAR, 2004.
- [21] 李世强, 杨汝良. 天线相位中心偏移方位多波束合成孔径雷达的误差分析[J]. 电子学报, 2004, 32(9).
- [22] 马晓岩, 吴顺华, 向家彬. 速度与 PRF 失配对 MPCSAR 成像的影响及补偿方法研究[J]. 电子学报, 2005, 33(12).
- [23] 邢孟道, 等. 分布式小卫星雷达空时频成像方法研究[J]. 宇航学报, 2005, (26) : 70- 77.
- [24] N. Gebert, G. Krieger, A. Moreira. SAR signal reconstruction from non uniform displaced phase center sampling in the presence of perturbations[C]// IGARSS, 2005.
- [25] N. Gebert, G. Krieger, A. Moreira. High resolution wide swath SAR imaging system performance and influence of perturbations[C]// IRS, 2005.

- [26] Zhenfang Li, Hongyang Wang, Tao Su, Zheng Bao. Generation of wide swath and high resolution SAR Images From Multichannel Small Spaceborne SAR Systems[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(1): 82– 86.
- [27] Zhenfang Li, Zheng Bao, Hongyang Wang, Guisheng Liao. Performance improvement for constellation SAR using signal processing techniques. IEEE Trans on AES, 2006, 42(2): 436– 452.
- [28] C. Fischer, C. Heer, G. Krieger, R. Werninghaus. A high resolution wide swath SAR[C]// EUSAR, 2006.
- [29] N. Gebert, G. Krieger, A. Moreira. High resolution wide swath SAR imaging with digital beamforming—performance analysis, optimization and system design[C]// EUSAR, 2006.
- [30] G. Krieger, A. Moreira. Spaceborne bistatic SAR: Potential and challenges[J]. IEEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation, 2006(153): 184– 198.
- [31] 马晓岩, 杨军. 多相位中心 SAR 虚假目标成对回波定位与强度研究[J]. 电子学报, 2006, 34(3).
- [32] 杨凤凤, 王敏, 梁甸农. 基于非均匀采样的小卫星分布式多通道 SAR 无模糊成像[J]. 电子学报, 2007, 35(09).
- [33] 马仑, 李真芳, 廖桂生. 一种稳健的利用分布式小卫星获取宽域、高分辨 SAR 图像的方法[J]. 航空学报, 2007, 28(05).
- [34] G. Krieger, N. Gebert, A. Moreira. Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing[J]. IEEE Trans on GRS, 2008, 46(1): 31– 46.
- [35] M. Younis, F. Bordonni, N. Gebert, G. Krieger. Smart multiaerture radar techniques for spaceborne remote sensing[C]// IGARSS, 2008: 278– 281.
- [36] N. Gebert, G. Krieger, A. Moreira. Digital beamforming on receive: Techniques and optimization strategies for high resolution wide swath SAR imaging[J]. IEEE Trans on AES, 2009, 45(2): 564– 591.
- [37] A. Freeman, W. T. K. Johnson, B. Huneycutt, R. Jordan, S. Hensley, P. Siqueira, J. Curlander. The “Myth” of the minimum SAR antenna area constraint[J]. IEEE Trans on GRS, 2000, 38(1): 320– 324.

(上接第 8 页)

- [6] Simon J. Hook, William B. Clodius, Lee Balick, etc. In flight validation of mid and thermal infrared data from the multispectral thermal image (MTI) using an automated high altitude validation site at Lake Tahoe CA/NV, USA[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(9): 1991– 1999.
- [7] P. M. Teillet, J. L. Barker, B. L. Markham, etc. Radiometric cross calibration of the Landsat 7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets[J]. Remote Sensing of Environment, 2001(78): 39– 54.
- [8] J. A. Barsi, J. R. Schott, F. D. Palluconi, D. L. Helder, S. J. Hook, B. L. Markham, G. Chander, E. M. O’ Donnell. Can. J. Landsat TM and ETM+ thermal band calibration [J]. Can. J. Remote Sensing, 2003, 29(2): 141– 153.
- [9] John R. Schott, Julia A. Barsi, Bryce L. Nordgren, etc. Calibration of Landsat thermal data and application to water resource studies[J]. Remote Sensing of Environment, 2001(78): 108– 117.
- [10] 蒋兴伟, 牛生丽, 唐军武, 等. SeaWiFS 与 HY-1 卫星 COCTS 的系统交叉辐射校正[J]. 遥感学报, 2005, 9(6): 680– 687.
- [11] 胡秀青, 戎志国, 邱康睦, 等. 利用青海湖对 FY-1C、FY-2B 气象卫星热红外通道进行在轨辐射定标[J]. 空间科学学报, 2001, 21(4): 370– 380.
- [12] 童进军, 邱康睦, 李小文. 一种卫星遥感仪器热红外通道在轨绝对辐射定标新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 277– 280.
- [13] 董仁杰, 李铜基, 陈清莲, 等. 热红外波段大气透过率和程辐射的估算方法[J]. 海洋技术, 2006, 25(2): 78– 83.
- [14] Frouin, R., P.-Y. Deschamps, P. Lecomte. Determination from space of atmospheric total water vapor amounts by differential absorption near 940nm: Theory and airborne verification [J]. J. Appl. Meteor, 1990(29): 448– 460.
- [15] 任洪启. 海面表层水温与表皮水温的相关研究[J]. 海洋技术, 2000, 19(2): 41– 48.
- [16] Sobrino, J. A., J. El Kharraz, Z.-L. Li. Surface temperature and water vapor retrieval from MODIS data[J]. Int. J. Remote Sens, 2003(24): 5161– 5182.
- [17] J.-J. LIU, Z. LI, Y.-L. QIAO, Y.-J. LIU, Y.-X. ZHANG. A new method for cross calibration of two satellite sensors [J]. INT. J. REMOTE SENSING, 10 DEC., 2004, 25(23): 5267– 5281.
- [18] X. Xiong, V. V. Salomonson, K. Chiang, etc. Summary of Terra MODIS Thermal Emissive Bands On-orbit Calibration [C]// IGARSS. 2005.
- [19] 朱利. 热红外辐射定标及地表温度反演研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [20] 张勇, 顾行发, 余涛, 等. 中巴地球资源卫星热红外通道的交叉辐射定标[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(4): 261– 266.