

新一代高能 γ 射线望远镜系统

王 焕 玉

在高能天文观测领域,实现对硬 X 和 γ 射线源的巡天搜索;高精度定位以至成像,始终是引人密切关注的一个重要方向.本文简单介绍编码孔径成像原理和技术,并介绍一种新的实际的旋转编码孔径成像 γ 射线望远镜系统.

硬 X 射线(20—120keV)和 γ 射线天文学的发展,需要高灵敏、高精度的望远镜系统.由于硬 X 和 γ 射线能量高于 3keV 时,会聚光学开始变得无能为力.从而造成了在这一领域内制作成像望远镜的特殊困难.

近年来,从事高能天文观测的科学工作者想了很多办法,希望能解决这一日益迫切需要解决的难题.日本宇航所小田等人提出用多层或多个不同间隔的条栅型旋转调制准直器实现成像.于 1978 年同 UCSD 合作在气球上观测蟹状星云,得到了 22—63keV 能区的强度分布图像,角分辨为 20 弧秒.但是,随着能量的提高,准直器制作困难,用这种方法实现对硬 X、 γ 射线的观测就有一定困难.1981 年秋,丹麦空间所曾用板条镶嵌的双闪烁探测器和旋转调制准直器,对 γ 爆炸作了定位精度约 10 弧分的观测.而近几年采用最多的是编码孔径成像技术.这一技术是在多针孔成像、随机条形孔径方法和富里埃变换谱仪等技术上发展起

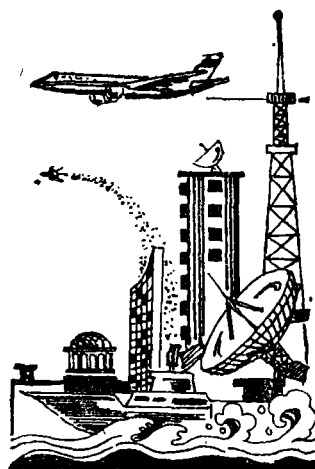
来的.这种成像方法,不需要任何镜头,使探测器能够同时观测源的全部区域.这种方法只需要一个栅网和位置灵敏探测器,不要求精密机构,因而发展较快.

它的特点是可实现宽视场观测,延伸源成像、点源的高精度定位.原则上可用于无针孔衍射效应的软 X 射线到几十 MeV 高能 γ 射线的任意能区.

编码孔径 γ 射线望远镜的基本思想是由针孔成像发展而来.因此,在描述编码孔径 γ 射线望远镜的原理之前,先简单介绍一下针孔成像及其功能.

① 针孔成像

在一块硬纸板上有一个小针孔,把它对着光源(例如图 1 所示),在纸板的另一侧放一块毛玻璃,适当调节它的位置,在毛玻璃上可以获得光源的清晰的倒影,这个现象,就是我们十分熟悉的小孔成像.显然,针孔



且 q 或 \bar{q} 还会辐射出胶子喷注,因此鉴别合适的喷注是常规法重建 W 不变质量的关键.基于蒙特卡罗模拟,一个四层的前馈式神经网络被设计用于 W 质量的重建,结果优于常规法,如图 4 所示,这是因为网络法更好地捕捉住了辐射胶子喷注的信息.

质量重建中一类很重要的问题是许多共振态粒子在其衰变末态中,由于有中微子而产生大的丢失能量,因而用常规的方法往往无法重建它的不变质量,我们最近的研究表明网络法可以在这方面大有作为.例如对 pp 对撞中的黑格斯粒子衰变道 $H^0 \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow e \mu \nu$ 事例,特别是高亮度下有堆积效应(pile-up)存在时,用网络法都正确地重建了 H^0 的质量,这对 LHC pp 对撞机上高亮度下通过 $H^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ 道寻找中能质量区的 H^0 粒子是非常重要的.

4. 前馈式神经网络的性能和优缺点

(1) 具有很强的模式识别功能,及很好的抗噪声和本底干扰的强健性(Robustness).

(2) 和传统的判别式(Discriminant)方法相比,它可以非常直接地近似和实现任意的连续函数操作功能,无需对各个物理量及截断条件进行非常仔细的研

究、构造和选取.做为这一优越性能的反面,一般情况下人们不能对网络内部的操作功能给出解析的描述.

(3) 网络结构的并行方式适宜于计算机并行运算,以及 VLSI 可编程电子学硬件的实现,因此将一改传统的诺曼(Von Neumann)串行计算机模式,实现高速度的函数操作功能,使其应用于探测器在线数据获取系统二级触发成为可能.

(4) 由于前馈式神经网络采用有监督的向后传播法进行训练,其函数操作功能依赖于训练样本的精确性,如蒙特卡罗模拟的精度.传统的用于事例筛选的判别法也是如此.许多研究说明,网络的这一误差是可以进行分析估计的,而由网络自身引入的误差一般并不大,并且也是可以控制和分析的.

(5) 局域极小值问题.若误差函数有多个极小值,在训练过程中则有可能陷入局域极小,而不能实现理想的操作功能.但在一般情况下,函数都是足够光滑的,并且通过开始时选取较大的训练强度 η 值,而后随着训练次数的增加逐渐减小,大多可以避免陷入局域极小.现在也提出了许多解决局域极小值问题的方法,如成功有效的玻尔兹曼机制等.

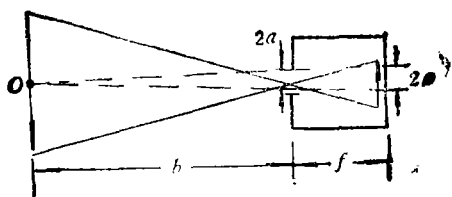


图1 针孔成像

不能太大,针孔太大就成不了像。

是不是针孔越小越好呢?也不是。因为当针孔半径 a 小到一定程度时,衍射效应开始起作用。由衍射效应所造成的扩展与孔的大小成反比。因而孔太小,成像反而不清晰,帕茨巴尔等人指出,当孔与像面之间的距离 f 为常数时,针孔圆的最小半径 a_{\min} 与点光源入射波长 λ 的平方根成正比 ($a_{\min} = \sqrt{0.61\lambda f}$)。

我们可以看出,针孔成像不用镜头,构造简单,它不需要对焦,而且没有畸变、像面弯曲等缺陷。最显著的特点是任何波段射线都能适用。但是,由于其孔径太小,成像太暗,信噪比太低。实用效果不很理想。

② 编码孔径成像

在能 γ 射线观测中,尽管针孔成像有较好的分辨率,但由于信噪比太低而远远达不到实用的要求。要提高信噪比,必须增大接收面积,即扩大孔径。但随着孔径的增大,像的分辨率就随之下降。为解决这一问题,人们提出了编码孔径成像技术。

如果一个成像板上有 N 个针孔,则像面上记录的像是由 N 个单针孔像叠加而成。这对点源的单孔成像来说,能使信噪比提高近 \sqrt{N} 倍。因而,选取适当的孔数 N 和适当半径 a ,便可以得到所期望的信噪比。编码孔径成像系统示意在图2中。

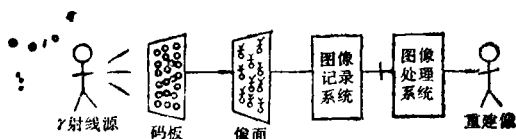


图2 编码孔径成像系统

从图2可以看出,编码板(简称码板)代替单针孔板。像面上所记录的像是一个相当复杂混乱的图像集,它是源和码板综合作用的结果。需采用合适的图像处理方法,方可使叠加像还原。

③ 编码孔径成像 γ 射线望远镜

高能天体物理观测中的编码孔径成像望远镜系统由编码孔径挡板和位置灵敏探测器以及数据、图像记录系统、姿态控制系统组成。如图3所示。

码板位于位置灵敏探测器的视线方向上,它是按照一定数学方法得到孔径分布方式做的许多小孔的遮挡板。在定向(姿态控制)机构的控制下,指向天区的

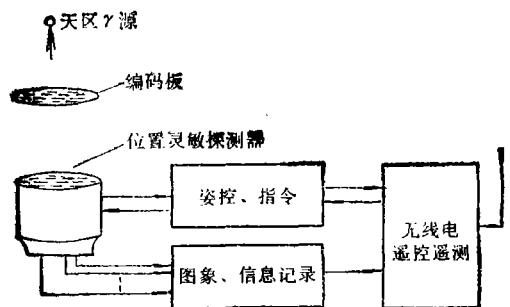


图3 编码孔径成像 γ 射线望远镜系统

某个 γ 射线源,于是在位置灵敏探测器上记录下探测器视场中通过每个小孔而得到的一系列天体和天区射线强度分布像。这些像交互重叠在一起构成一个复杂的画面,整个系统都围绕着得到宽视场角和清楚的图像这一目的。

一个好的编码孔径成像 γ 射线望远镜系统应该是:

1) 最佳码板设计

码板设计分为孔径图案和孔径大小设计。假定天体或天区源的强度分布为 $O(x, y)$,码板孔径分布函数为 $A(x, y)$,在小孔位置取值为1,表示对射线透明;在遮挡位置取值为0,表示射线被阻挡。如果把小孔开成同样大小,整个挡板按这样大小相等地分成 N 个小单位 (cell),按某一特定图案开孔。那么, $A(x, y)$ 便是由 (0,1) 组成的一个矩阵,当小孔随机分布时,像在探测器面上的强度及位置与孔径分布相关。若用 $P(x, y)$ 表示位置灵敏探测器记录到的像的分布函数,那么, $P(x, y)$ 是源强度分布 $O(x, y)$ 和码板分布 $A(x, y)$ 相关作用的结果。

简言之,编码板上的每个针孔,都具有对辐射源成像的能力,所获得的编码孔像的数据是由板上所有有效单孔的像信息迭加而成。但未经处理的像信息中,不可能直接地找到辐射源的任何特征。为了找到视场中每个辐射源的特征参量(位置、强度等),必须选用适当的光学处理或者数据分析的方法,对所获得的编码孔径像或数据进行处理,使之还原成单一的像,或者可描述的特征量。

因此,码板图案的最优设计将使数据处理、图像还原最方便和最有效。

码板的大小,依探测器的尺度而定。一般要保证在视场角要求的最大角度上的点源能照出完整的像。而不造成像的边缘退化。近年来有许多人致力于码板的专门研究。

2) 性能优良的位置灵敏探测器

为得到清晰的图像,要求探测器的灵敏面积对射线的探测效率是均匀的,得到的位置坐标和实际的坐标是线性的(即失真度小),位置分辨本领要高。

3) 高的系统角精度

系统的角精度被定义为码板中单元 (cell) 尺度 Δx 与码板到位置灵敏探测器的距离 D 之比, 即 $\Delta x/D$. 这个比值越小, 角精度越高, 望远镜的性能越好. 但是 Δx 不能太小, D 也不宜太大. 因为 Δx 太小, 象的质量会下降; 而 D 太大, 给望远镜系统 (包括吊三系统) 的制造带来许多困难.

4) 优良的观测灵敏度

系统的灵敏度与码板的设计的优劣及探测器的性能好坏直接相关. 因系统的灵敏度由它的信噪比决定. 一个好的码板, 可以使信号中的噪声在一定程度上可以处理得较为理想. 但是, 即使最佳的码板, 系统也还有探测器等引入的各种噪声, 其信号噪声比与源的通量、探测系统的探测效率、码板遮挡部分的透过率以及观测时间等有关. 一般来说, 系统探测效率越高, 源的通量越强, 观测时间越长, 信噪比就越好, 系统的探测灵敏度就越高.

Aithouse 和 Cook 等人在 NASA 的支持下于 1986 年 10 月研制成的一种球载 γ 射线成像望远镜系统 CAIGRT.

这是一种旋转编码孔径成像望远镜系统, 它的位置灵敏探测装置由直径为 16" NaI(Tl) 闪烁体和 19 个光电倍增管构成; 背后由一块同样大小的 NaI 圆盘做反行合屏蔽和备用探测装置, 以减小本底噪声, 在主探测器边缘最外层由 12 块塑料闪烁体和 12 个 5" 光电管形成一筒状屏蔽层.

它的码板位于主探测器视线方向的 2.5 米处, 其厚为 2cm. 图案为 URA 方式 (一种称为均匀冗余阵列的码板). 每个单元为六角形, 边到边的距离是 2.5 cm, 其每单元的半边是开口, 而另外半边是铅, 以形成屏蔽挡板. 共有 2000 个这样的单元.

由于在观测期间码板是连续旋转的, 形成了一种对 γ 射线入射的位置随时间调制的探测器. 其效果是使获得的图像单元的数量大约增加了一个数量级. 并且每 20 秒钟就使得每个探测器的本底得以扣除. 此系统具有下列性能:

- (1) 在 30keV—5MeV 能区内具有良好的灵敏度;
- (2) 20 度的视场角;
- (3) 0.6 度的角分辨;
- (4) 1070 幅的成像能力;
- (5) 25G Byte 数据记录能力;
- (6) 1.4M Baud 数据传输能力.

利用这一望远镜系统, 对不同天区的瓣状星云和天鹅座 X; 进行观测, 取得了较好的结果.

从前面介绍可知, 在高能天体物理及天文观测中的编码孔径成像 γ 射线望远镜系统有三个关键环节, 其一是码板的设计; 其二是位置灵敏探测器的制造; 其三是与探测器相匹配的空间核数据获取系统和控制 (包括遥控) 系统以及传送系统.

空间核数据获取技术要求, 低功耗, 可靠性高, 动态范围宽, 测量参量多, 数据量大. 可以预计, 今后几年, 空间核数据获取系统将会有更快的进展.

目前, 在国外, 编码孔径成像技术望远镜只有少数几个国家刚刚投入使用. 而我国也已有开展这方面工作的基础. 30 万立方米科学气球的成功发放; 空间核数据获取系统和传送系统的微机化的完成; 北京谱仪中各种大型位置灵敏探测器的研究成果, 都将在我国进行高能天体物理实验中的高精度定位观测创造良好的条件. 可以预期, 在最近几年内, 会有我们自己的编码孔径成像高能 γ 天文望远镜系统随着气球或者卫星飞上高空, 开创我国高能空间观测的新局面.

欢迎订阅《中外产业科技》

谁早一日利用《中外产业科技》

谁就早一日创造卓越走向世界

国际标准刊号: ISSN 1005—8419

国内统一刊号: CN13—1186/T

(邮发代号: 18—163)

《中外产业科技》是由中国科学技术协会主管、中国技术经济研究会和河北省科学技术协会主办的面向全国公开发行的综合类中央级双月刊. 它是联合中国权威机构、世界官产学研部门为广大的产业界、经济界、科技界人士搜集、整理、

反馈产业所需科技与经贸信息、资料、知识、政策的外向型高档印刷国际标准刊型的刊物, 具有绝对的权威性. 它倡导为产业、产业家办实事, 为产业产品提高在世界市场的占有率, 搞好资金、技术、项目、设备、人才引进及国际交流, 提供卓有成效的技术经济信息与服务. 它是研究、管理者的论坛, 是产业、产业家提高效益、成就事业的得力助手和进行中外经济、技术合作与交流的畅通渠道.

《中外产业科技》双月 28 日出版. 全年订价 53.28 元, 全国各地邮局 (所) 均可订阅. 若漏订者, 经银行汇款至: (050000) 中国河北省石家庄市石岗大街市庄路 2 号, 中外产业科技杂志社邮购. 开户银行: 石家庄市工商银行石岗办, 帐号: 210—02490095—449 电话: (0311)7059672, 联系人: 潘先驱 朱文欣