



海量遥感数据存储管理技术综述

吕雪锋^①, 程承旗^{①*}, 龚健雅^②, 关丽^③

① 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;

② 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

③ 北京市测绘设计研究院, 北京 100038

* E-mail: ccq@pku.edu.cn

收稿日期: 2010-12-08; 接受日期: 2011-05-30

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 61399)资助项目

摘要 针对海量遥感数据的存储管理问题, 以 NASA EOS, World Wind, Google Earth, Google Maps, Bing Maps, Microsoft TerraServer, ESA, Earth Simulator, GeoEye, 天地图, 中国资源卫星应用中心, 国家卫星气象中心, 国家海洋应用中心等 13 个数据存储中心或系统为例, 重点从遥感数据的存储组织方式与存储架构方面, 综合与分析各个数据存储管理技术的特点与优势. 通过综述国内外实际的数据存储与管理技术, 有利于寻求更适合于海量遥感数据存储的技术与方法, 应用于我国海量遥感数据存储管理的实际工作中.

关键词
遥感数据存储
数据管理
存储架构
数据组织方式

随着人类对地卫星观测系统的发展, 遥感数据逐步呈现多源, 多尺度, 多时相, 全球覆盖和高分辨率特征, 数据量爆炸性增长, 形成 GB 级, TB 级, PB 级的发展趋势; 如何更有序, 更高效地存储与管理海量遥感数据, 形成统一的存储组织标准(基准, 尺度, 时态, 语义), 实现遥感信息的快速共享与分发, 已经成为空间信息科学领域研究, 业务应用部门和机构重点关心的问题之一^[1~7]. 由于遥感数据的实际应用和服务总是与地理空间位置直接关联, 因此海量遥感数据高效存储问题的一个重要方面则在于结合遥感数据的空间特性, 建立合理的, 科学的, 统一的全球遥感数据存储组织模型与相应的存储架构. 本文以 NASA EOS, World Wind, Google Earth, Google Maps, Bing Maps, Microsoft TerraServer, ESA, Earth Simulator, GeoEye, 天地图, 中国资源卫星应用中心, 国家卫星气象中心, 国家海洋应用中心等数据存储中心或系统为例, 重点从遥感数据的存储组织方式

与存储架构方面, 综述各个数据存储管理技术的特点与优势, 以有利于寻求一种全球遥感数据存储组织模型与存储架构, 使之更适合于海量遥感数据的存储与管理.

1 国外遥感数据存储与管理技术

1.1 NASA EOS 数据中心

NASA EOS 对地观测系统主要包括空间观测系统平台, 数据和信息系统, 科学研究计划等三部分. 其中, 地球观测系统数据和信息系统(Earth Observing System Data and Information System, EOSDIS)是 NASA 存储与管理全部 EOS 数据的解决方案^[8].

1.1.1 EOS 数据规模与面临的存储管理问题

在数据规模上, EOS 数据涵盖了大气, 土地利用, 植被覆盖, 雪冰, 海洋等多个地学领域的不同分辨率,

不同时间周期的卫星影像数据, 具有全球性, 多源性, 多尺度性. 据 NASA 在 2009 年 10 月 1 日至 2010 年 9 月 30 日期间统计(<http://esdis.eosdis.nasa.gov/eosdis/systemmetrics.html>), EOSDIS 平均每日数据存档增长为 2.9 TB/d, 终端用户平均每日分发数据量为 9.9 TB/d, 总存档数据量达 4.5 PB.

面对海量 EOS 数据的存储与管理, EOSDIS 经历了三个困难阶段^[9, 10]: 1) 在 1995 年, EOSDIS 面临的重大问题是如何能够有效地存储与管理所有 EOS 数据, 即如何先解决把所有数据都存储下来的问题; 2) 10 年之后, 到 2005 年, 随着 EOS 数据量的巨大增长, 面临的重大问题是如何在浩瀚的数据中帮助用户快速找到他们所需要的任何数据, 并且快速地将数据分发给用户; 3) 随着 EOS 数据存储与管理规模的发展, 目前面临的问题是如何更高效, 低消耗地存储, 管理与维护 EOS 数据.

1.1.2 EOS 技术途径与优点

EOSDIS 采用一种分布式, 开放的系统架构, 按照地球科学的学科依次划分各个分布式数据存档中心(Distributed Active Archive Center, DAAC), 每个 DAAC 负责管理一个特定学科领域的 EOS 数据和用

户服务. 如图 1 所示, EOSDIS 主要由任务系统和科学系统两个部分组成. 科学系统负责数据产品生产, 存档, 管理和分发; 任务系统负责卫星和传感器的指挥控制, 数据获取和初级处理(生成 L0 级数据产品). 其中, 大多数 EOS 数据的标准数据产品(L1~L4 级数据产品)由数据处理系统 SIPSs 负责生产(目前共有 14 个分布在美国各地的 SIPSs), 并将所产生的数据产品交付给各个 DAAC 来存档和分发^[11].

目前, EOSDIS 共有 12 个 DAAC, 原计划在每个 DAAC 部署一个科学数据处理分系统, 即 EOSDIS 的核心系统(EOSDIS Core System, ECS), 为每个 DAAC 提供数据吞入, 存档, 分发和用户服务等通用的“核心”软硬件系统. 在物理架构上, 大多数的数据采用近线磁带存档管理, 在线数据服务系统采用由高性能的 SAN 构成的数据存储池, 提供 FTP 或 Web 服务; 在数据管理软件上, 采用商业软件和定制软件相结合, 并提供统一的软件工具包, 以方便数据产品在科学计算设施(SCFs), SIPS, DAACs 之间的数据转移^[11]. 在遥感数据存储与管理技术与方法上, EOSDIS 值得借鉴的方面有以下几点.

1) 整个系统采用统一的数据存储格式: 为了有效地存储地理定位数据, 并为各种类型的 EOS 数据

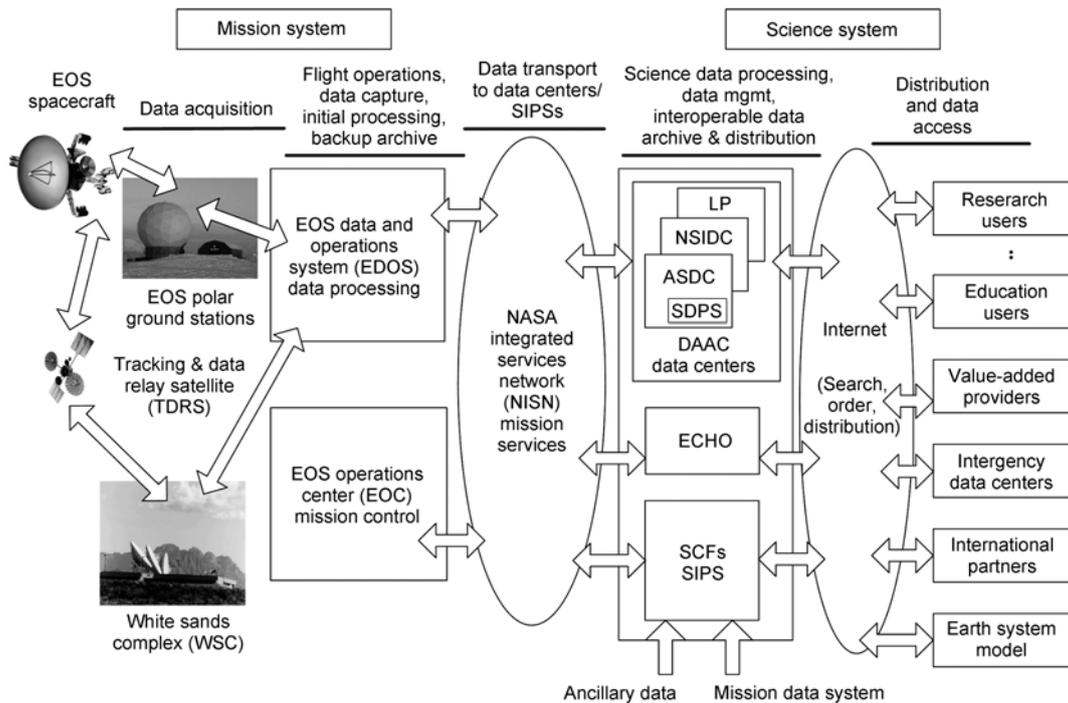


图 1 EOSDIS 系统总体架构

产品在 EOSDIS 分布式系统环境中提供一个统一的访问接口, EOSDIS 采用了一种扩展的分层数据格式, 即 HDF-EOS 数据格式, 作为 EOS 数据产品的标准格式. HDF-EOS 是在 HDF 支持的 6 种数据类型基础上, 扩展定义了三种地理空间数据类型(点 Point, 网格 Grid, 刈幅 Swath), 将地球科学遥感数据与地理点捆绑在一起. 并且引入结构化的元数据, 用于描述 HDF-EOS 文件的内容和结构, 即描述地理位置, 时间和地图投影信息是如何与数据本身相关联. 其中, 刈幅数据类型主要应用于 L1~L2 级数据产品, 网格数据类型主要应用于 L3~L4 级数据产品^[12, 13].

2) 建立统一的时空元数据目录框架: EOSDIS 通过建立 EOS 交换站(EOS Clearing House, ECHO)作为各个数据中心之间的一个互操作性的中间件, 提供用于数据与信息交换的时间和空间元数据交换平台. ECHO 在一个公共的元数据模型下, 提供 EOS 数据注册和服务注册, 即不管数据被物理存储在哪个数据中心, 用户都可以统一定位查找数据. 在数据查询服务上, ECHO 采用基于 Web 技术的仓库库存搜索工具界面(Warehouse Inventory Search Tool, WIST)提供按照学科, 种类属性, 关键词, 数据类型, 数据区域, 时间范围等查询方式的“一站式购物”(One-stop Shopping)^[14].

3) 利用 Linux 系统自身特点在线自动存储管理的尝试: 为了提高数据的互操作性, 可用性, 数据访问和处理速度, 实现执行用户响应的分布式多源信息提取, 同时降低商业数据管理软件的运营成本, NASA 在 2006 年通过重用内部开发, 采用了一种简单的, 可扩展的, 基于脚本的科学产品存档数据管理系统(S4PA), 以替代 EOSDIS 的核心系统(ECS). S4PA 系统主要利用 Linux 目录分级组织管理文件以代替数据库系统. 数据以分级结构存储于磁盘阵列中, 通过对应于每个目录的“触发器”命令启动工作任务, 与 FTP 服务器相连的所有数据均实现自动化的在线存储. 数据分级结构的最上层是数据组 Data groups, 下面一层是数据集 Data sets, 最后以数据文件按观测时间存储于不同的目录中^[15].

1.2 World Wind 遥感数据存储管理技术

针对在线遥感数据的存储, 管理与访问方法, NASA 开发了一个开源的三维, 可交互的虚拟地球 World Wind.

1.2.1 World Wind 遥感数据存储组织方式

World Wind 采用球面等经纬度格网下的多分辨率影像瓦片层来存储组织遥感影像数据, 如图 2 所示. 第一层(Layer 0)先将球面按照 $36^{\circ} \times 36^{\circ}$ 瓦片大小划分为 10×5 个正方形瓦片; 然后再将每个瓦片进行 4 等分划分, 即划分成每个瓦片大小为 $18^{\circ} \times 18^{\circ}$, 共 200 个瓦片; 依次逐步细分地球表面. 最后按照设定的层级, 采用固定像素大小(512×512 像素)的瓦片影像对应每个层级下的每个网格瓦片. 系统采用可利投影(Plate Carreé Projection), 每个瓦片影像名称由该瓦片影像所在层级的行列号来命名, 在存储时按照“瓦片数据集\层级\行序\行序_列序.影像格式”方式组织管理瓦片影像文件^[16, 17]. World Wind 这种存储组织思想的特点在于利用遥感数据的空间区域特征, 按照地球空间位置存储组织遥感数据.

1.2.2 World Wind 系统的存储架构

在系统存储架构上, World Wind 系统采用服务器集群存储方式来存储与分发遥感数据, 如图 3 所示. 根服务器根据 HTTP 请求具体确定数据集的类型与地理位置, 并将接收到的请求发送给适当的处理服务器. 面对大量用户的并发访问, World Wind 采用处理服务器按需处理数据机制与多线程处理池策略, 即先查询缓存结果中是否有用户请求的数据, 如果没有, 再计算处理原始的数据文件; 每个处理服务器

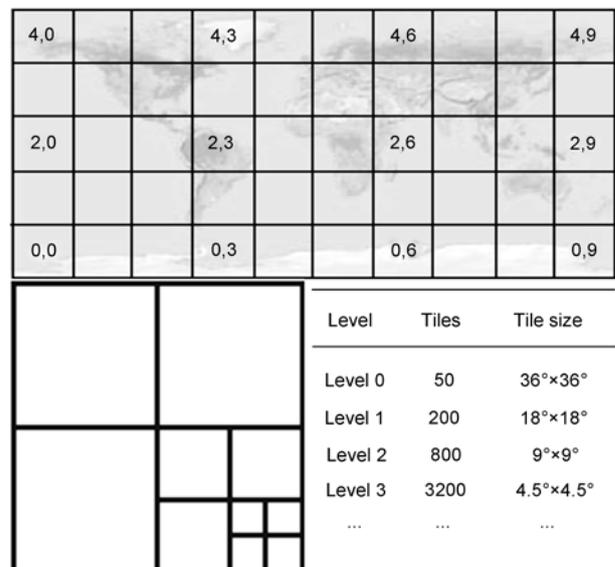


图 2 World Wind 遥感数据瓦片分块存储组织方案

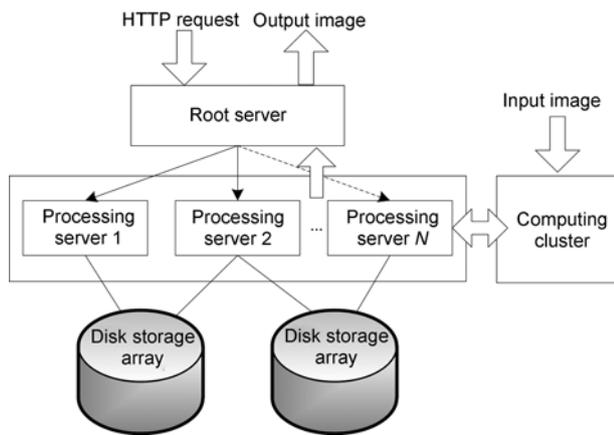


图3 World Wind 系统存储管理技术架构的示意图

都采用单个线程响应处理检索缓存数据产品的所有请求, 其它所有请求采用多线程处理池来处理, 以快速响应大量数据请求和高负载的数据处理^[17].

1.3 Google Earth 与 Google Maps 在线遥感数据存储管理技术

美国 Google Earth 影像地球系统于 2005 年 6 月推出, 展现了新一代遥感影像数据管理平台在信息存储管理与应用方面的技术优势, 提供了最高效率的, 快速反应的三维视图. Google Maps 主要提供矢量地图, 卫星影像与 3D 全景影像.

1.3.1 Google Maps 遥感数据存储组织方式

Google Maps 采用基于四叉树的瓦片数据层叠加技术来存储组织遥感影像数据, 瓦片划分方式如图 4 所示. 第一层(Level 0)采用一个瓦片影像来表达整个球面, 其中心位于经度 0°与纬度 0°, 然后每个瓦片作为一个四叉树的父节点, 依次等级细分地球表面. 在存储组织时, 系统采用墨卡托投影, 每个瓦片影像参照金字塔模式按照不同的缩放等级依次存储, 即按照“瓦片集\放大层级\行序\列序.影像格式”方式. 并

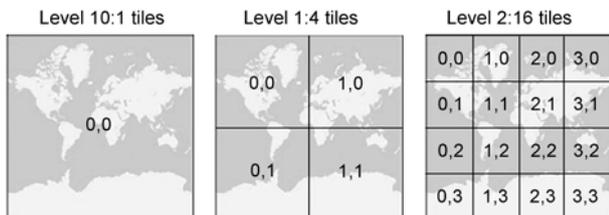


图4 Google Maps 遥感数据存储组织方案

且每个瓦片父节点下的四叉树瓦片影像按照从左上到右下顺序依次采用字母“QRST”编码索引. 每个瓦片影像具有固定像素大小(256×256 像素), 影像格式为 JPEG 与 PNG^[18].

1.3.2 Google Earth 影像地球数据组织方式

Google Earth 采用多分辨率影像层叠加技术来组织遥感影像数据, 即不同分辨率的瓦片影像在 WGS84 经纬度坐标系下按照放大层级依次叠加, 每个瓦片像素大小不要求是统一固定大小, 但必须是正方形瓦片, 即 256×256, 512×512, 1024×1024, 2048×2048 等四种像素大小. 层级结构中的每个瓦片影像采用单独的 KML 文件标记影像文件的相对路径, 地理范围, 放大层级, 以及与上下层级瓦片影像的对应关系; 瓦片数据集采用一个主 KML 文件来标记. 每个瓦片影像和 KML 文件名称采用瓦片的列序来命名, 参照金字塔模式按照“瓦片数据集\放大层级\行序\列序.影像类型”方式存储组织文件; 影像格式为 JPEG, PNG 或 GeoTIFF^[18, 19].

1.3.3 Google Earth 集群存储技术

在遥感数据存储管理技术方面, Google Earth 与 Google Maps, 以及最近发布的 Google Earth Builder, 都是依托于 Google 云计算技术实现海量遥感数据的在线存储与应用. Google 云计算的基础架构主要由分布式文件系统 GFS, 索引大表 BigTable, 并行计算算法 MapReduce, 分布式服务器锁服务 Chubby 等四个相互独立又紧密结合的系统构成(图 5). 其中, GFS 处于所有核心技术的底层, 负责遥感数据文件的存

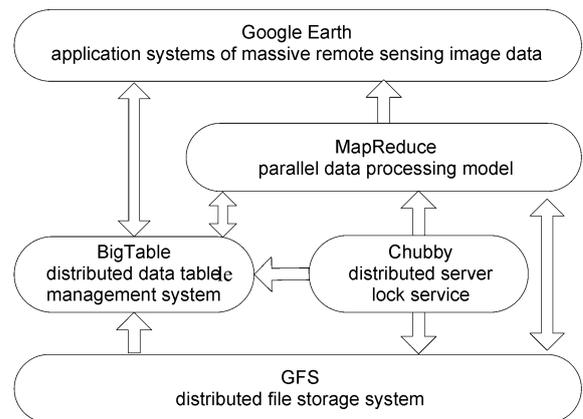


图5 Google Earth 集群存储管理技术架构

储^[20-22].

在系统内部管理和调度响应上, Google Earth 主要采用运行在 GFS 之上的索引大表 BigTable 来管理全球遥感数据, 即利用 Google 分布式服务器集群形成虚拟索引数据库, 快速、准确地找到不同空间范围和不同分辨率的影像数据. BigTable 集群系统调度与数据操作如图 6 所示, 将一个用于索引 GFS 文件系统中数据的大表部署在上百个子表服务器上, Master 主服务器主要负责对子表服务器的协调和调度, 客户程序可直接和子表服务器通信进行读写操作. 在与外部用户交互时, 采用基于 Ajax 技术的网络数据异步传输机制, 将用户与 Ajax 引擎的互动和 Ajax 引擎与服务器的互动分离. 当用户做出一定的操作动作时, Ajax 引擎根据一定的算法计算出需要新加载的瓦片影像, 并异步多线程的向服务器发出请求; BigTable 采用 In-memory 列族策略, 在较低的响应延时下, 快速处理大量的请求, 并将瓦片影像传回用户端; 再由 Ajax 引擎无刷新的无缝拼接用户界面中的影像. 并在用户浏览器中采用缓存机制, 对已经获取到的瓦片影像, 下次使用时则不再向服务器发送请求, 直接利用缓存中的瓦片影像即可, 以至用户可以几乎无等待地进行自己的各种动作. 从而满足全球每天成百万, 甚至上千万用户的并发访问需求^[22-25].

1.3.4 Google Earth 集群存储系统的优点

- 1) 控制流和数据流的分离: GFS 和 BigTable 系统都采用中心服务器模式, 形成在逻辑上统一命名空间, 数据服务器分布配置的管理机制.
- 2) 数据分块并行存储: 数据以文件的形式, 按照固定大小进行分块(默认 64 MB)存储在多个数据服务器上, 从而提高整个系统的 I/O 并行度.

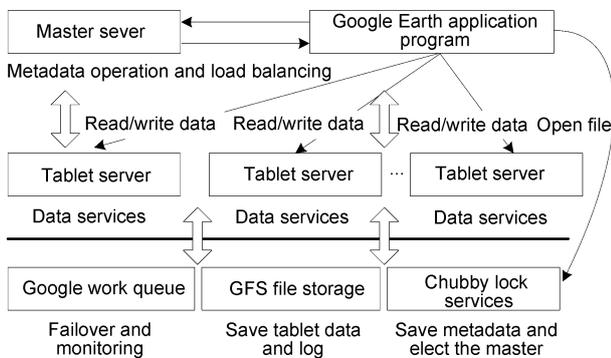


图 6 Google Earth 系统调度与数据操作示意图

1.3.5 Google Earth 集群存储系统的不足

- 1) Google Earth 将不同分辨率, 多源遥感数据在“纵向”上组织在不同的层级, 但在“横向”上没有考虑同一层级中多源遥感数据的组织问题;
- 2) 在数据存储时, 将同一区域, 不同分辨率的数据大量的分散存储在不同的存储节点上, 利用“空间换时间”策略组织, 存储, 但在提供数据服务时, 这种架构要求所有存储节点与服务都必须时刻在线运行, 又造成系统维护和耗电量巨大.

1.4 Bing Maps 遥感数据存储管理技术

Bing Maps 是微软继 Virtual Earth 之后发布的一种在线地图服务平台, 提供矢量地图, 卫星影像与 3D 全景影像.

1.4.1 Bing Maps 遥感数据存储组织方式

Bing Maps 采用基于四叉树的自定义瓦片层结构, 瓦片划分方式如图 7 所示^[26]. 第一层(Level 1)采用 2×2 瓦片分割整个地球表面(4 个瓦片的公共点位于经度 0 与纬度 0); 然后再将每个瓦片作为四叉树的父节点, 依次 4 等分地球表面. 系统采用墨卡托投影, 每层中的每个网格瓦片对应一个固定大小的瓦片影像(256×256 像素), 影像文件由该瓦片所在层级的列序来命名, 其格式采用 JPGE 或 PNG.

1.4.2 Bing Maps 集群存储技术

Bing Maps 主要依托微软数据中心的分布式集群存储系统与云计算平台(Windows Azure Platform), 其整体架构如图 8 所示^[27, 28]. 在数据存储时, 云计算服务的操作系统 Windows Azure 将每个数据文件都复制备份三份, 每个瓦片影像作为二进制大对象存

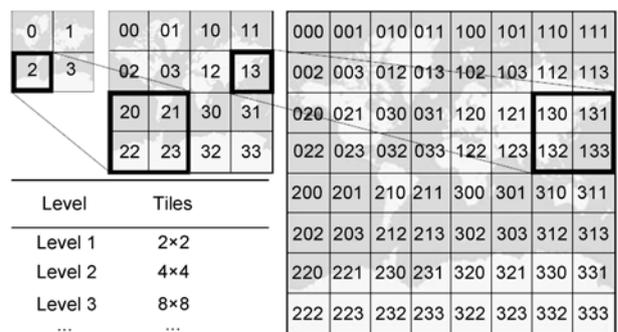


图 7 Bing Maps 自定义的瓦片层划分方案

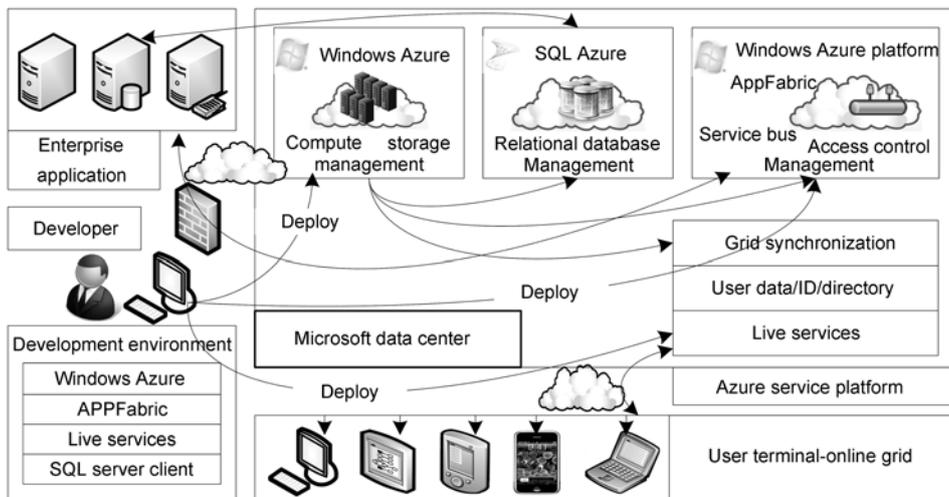


图 8 Bing Maps 的云计算平台示意图

储在 Blobs 中。基于 SQL Server 技术构建的核心关系数据库 SQL Azure 主要负责关系数据的存储和数据访问，以及管理组件的自动配置和负载平衡，为大量用户访问请求的提供快速的数据索引和调度响应。Net Services 为本地应用和云中应用提供分布式的基础架构服务，以支持跨语言，跨平台，跨不同标准协议的互操作。在与用户交互上，Bing Maps 采用基于 Silverlight 的内容分发网络。当客户发出请求时，该请求被发送到最近的内容分发网络节点，瓦片被编译后，便快速返回瓦片影像；并采用内容分发网络的缓存机制保障瓦片影像的传输数据。

1.5 TerraServer 遥感数据存储管理技术

TerraServer 是世界上最大的在线公共地图集之一，主要通过 Internet 对外提供高分辨率的航空，卫星，地形影像数据。TerraServer 采用按照地球投影区域来存储管理数据的思想与方法。

1.5.1 TerraServer 遥感数据的存储组织方法

TerraServer 采用 UTM 投影，在北纬 84°至南纬 80°之间按照经度 6°，将地球分割为 60 个 UTM 区域，如图 9 所示，美国占据 10 个 UTM 区域(第 10~19 区域)；然后按照数据集主题与 UTM 投影区域存储所有 USGS 遥感数据^[29-31]。

1) 瓦片存储：每个遥感影像数据按照固定像素大小的瓦片(200×200 像素)存储在 SQL Server 数据库表中的列中(BLOB)，影像文件采用 JPEG, GIF 或

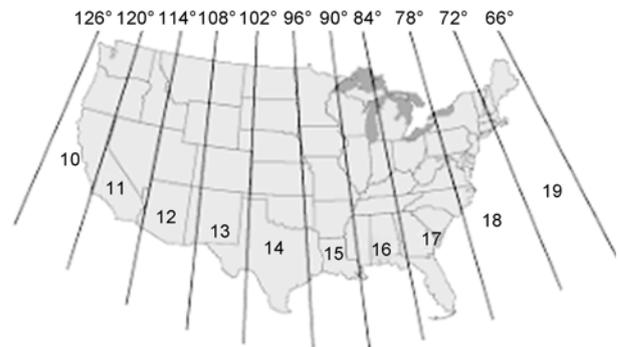


图 9 TerraServer 采用的 UTM 区域划分方案

TIFF 等。

2) 影像景组织：每个景对应一个 UTM 区域，由一个数据主题的所有瓦片影像在逻辑上形成的一个无缝的马赛克(Mosaic)；每个数据库存储一个或多个景，每个景用景 ID 编码(SceneID)来标识。由于每个景都是二维平面，每个瓦片影像都能够通过它所在的 UTM 景区域，数据主题，分辨率层级，以及在该景中的相对位置坐标 X 和 Y 来定位。

1.5.2 TerraServer 物理存储架构

在 2000 年，TerraServer 采用由存储区域网 SAN 和 Microsoft 集群服务管理构成的 SAN Cluster 存储架构，如图 10(a)所示。在存储区域网 SAN 中，将磁盘阵列分为 3 个数据库，每个数据库存储同一主题的数据，并采用磁带库作为数据备份；在 2003 年，为了增加在线存储容量，同时减少运行成本，采用由低廉的

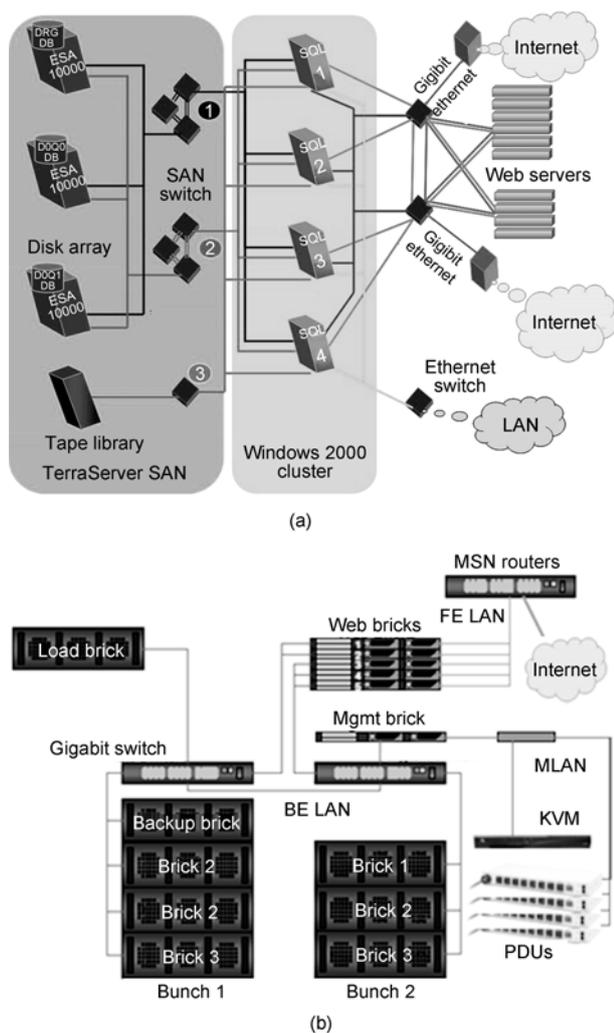


图 10 TerraServer 物理存储架构

(a) SAN Cluster storage architecture; (b) TerraServer Bricks storage architecture.

SATA 硬盘盘阵阵构成的“存储积木”架构(TerraServer Bircks), 如图 10(b)所示. 尽管物理架构形式有所改变, 但遥感数据存储组织方法基本是一致的^[31-33].

1.6 ESA 数据中心

针对海量遥感数据的存储与管理, 欧空局 ESA 数据中心在总体存储架构上采用基于任务的分布式存储, 即在一个多任务存档目录框架下(Multi-mission Catalogue), 以 ESRIN 数据存档中心为参考的分布式数据存储(2007 年共有 12 个数据存档中心)^[34].

在数据存储方式上采用分级存储管理系统, 即在线数据采用基于磁盘的 SAN+Cluster 存储, 近线数

据采用数据采用磁带库存档; 在数据管理上, 采用卫星名称与时间为序的数据库管理方式. 但 ESA 在遥感数据存储管理技术方面体现了以下两个优点.

1) 数据充分共享与长期保存的思想与策略: 在海量遥感卫星数据存储管理上, ESA 更趋向于寻求一种基于网络的资源共享方式, 通过统筹规划与建立地面高速网络连接各个分布式资源, 实现各类遥感卫星数据在欧盟国家的充分共享和遥感地面设施的资源共享. 例如, 先后建立了欧洲地球观测按需服务网络(G-POD), 欧洲地球科学地面协作网——数据仓库(GENESI-DR), 以提供获取, 存储, 管理, 访问 PB 级遥感数据的能力^[35, 36].

2) 建立统一的 SAFE 数据存档格式: 对于多源遥感数据的存储管理来讲, 统一的标准是信息共享与互操作的基础. ESA 通过建立 SAFE 的信息模型, 逻辑模型与物理模型统一了 ESA 数据存档格式^[36].

1.7 Earth Simulator 集群管理技术

日本的地球模拟器(Earth Simulator)于 2002 年建成, 是一个用于模拟地球自然地理过程的集成计算与存储环境. 由于电力消耗和维护成本太大, 在 2009 年从 640 个计算节点减少到 160 个计算节点, 由此使耗电量降低了 20%~30%; 但通过升级更新计算节点的硬件和系统软件, 系统的存储和计算性能提高了 2~3.5 倍^[37]. 由此可见超大规模数据计算与存储系统的能耗问题是一个应该值得重视的问题. 对于海量遥感数据的存储与管理技术, 地球模拟器值得借鉴的方面主要在于计算节点的网格划分和集群系统的并行机制与调度控制.

1.7.1 计算处理器或节点的地理网格划分思想

在进行大气, 海洋模型模拟计算时, 地球模拟器采用立方体网格, 经纬度网格, 或阴阳网格系统在一定尺度下划分地球表面(图 11)^[38, 39], 每个处理器或节点负责所属网格单元区域的数据计算. 这种按照地理网格划分计算处理器或节点的思想, 从某种意义上讲, 可以归引出一存储与管理的策略, 即按照遥感数据的空间区域特征, 每个计算处理器或节点负责存储与管理所属网格单元区域的遥感数据.

1.7.2 高度并行调度机制

在海量遥感数据集存储时, 地球模拟器的分

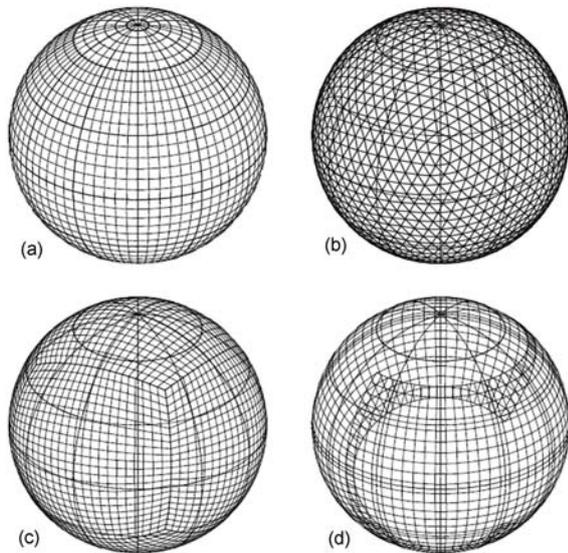


图 11 大气模式中 4 种较为常用的准均匀网格

(a) Latitude and Longitude Grid; (b) Icosahedron Grid; (c) Cube Grid; (d) Yin Yang Grid.

级并行管理机制有利于遥感数据的计算处理, 存储与管理^[40, 41].

1) 处理器内部的并行: 单个处理器由 8 套向量单元构成处理器内部的并行, 在遥感数据存储上可延伸体现为单个磁盘或磁盘阵列内部并行.

2) 节点内部的并行: 每个计算节点由 8 个处理器构成节点内部的并行, 在遥感数据存储上可延伸体现为集群存储节点内部.

3) 分布式节点间的并行: 将每 16 个节点作为一个小集群系统“S-Cluster”, 则原先的 640 个节点可划分为 40 个 S-Cluster, 并且每个小集群有一个集群控制站(CCS)来负责监控节点的节点状态和电力情况; 一个节点的工作, 就可以用 S-Cluster 来处理, 其它小集群系统被称为“L-Cluster”, 用于中等规模和大规模数据批量处理作业. 并且一个超级集群控制站(SCCS)提供单一系统镜像, 整合和协调所有的 CCS 操作. 那么在遥感数据的存储管理上, 如果借鉴地球模拟器的集群管理思想, 将一个或者多个存储节点对应一个地理空间区域, 就可以根据遥感数据的区域, 按需动态控制与调度各个存储节点.

1.8 GeoEye 影像存储管理技术

GeoEye 目前是世界上最大的商业遥感卫星影像公司. 据 2010 年统计, Geoeye-1 和 IKONOS 的遥感数据已达 4.2 亿平方公里; 并且每天的存储数据量都

急剧增长. 对 GeoEye 来讲, 如何高效, 有序地存储管理海量遥感数据也面临着巨大的挑战^[42].

在遥感数据的长期保存管理与数据同步共享方面, GeoEye 最初采用内部自行研发的分级存储管理应用软件进行磁盘池与磁带库之间的数据迁移; 为了简化分级存储管理程序与系统维护, 增强数据的互操作性与系统的扩展性, Geoeye 使用 StroNext 数据管理系统充当摄取, 处理和分发系统之间的“黏合剂”, 将用于数据摄取的 SGI 系统和用于影像生产处理的 Windows 系统连接到共享存储池, 实现单一数据集在不同系统之间的同步共享^[43].

2 国内遥感数据存储与管理技术

2.1 天地图在线遥感数据存储管理技术

由国家测绘局主导建设的国家地理信息公共服务平台“天地图”(Map World)网站于 2010 年 10 月 21 日试运行, 2011 年 1 月 18 日正式上线, 为公众提供了一个基于大型互联网的统一地理信息服务平台, 也将在我国的公共服务平台建设中起到重要的作用. 天地图以武汉大学与武大吉奥公司研发的 GeoSurf 和 GeoGlobe 为基础软件平台^[44], 为用户提供矢量, 影像, 地形和地名的二维和三维视图浏览与查询功能, 以及标绘, 距离和面积的量算服务. 天地图的主要设计思想是: 把全国地理信息数据资源整合为逻辑上集中, 物理上分布的“一体化”公共地理信息数据体系, 形成多个部门分建共享, 联动更新和协同服务的地理信息资源共建共享机制.

1) 数据特点: 总数据量约 30 TB, 处理后的电子地图总瓦片数约 30 亿, 将数据以不同的应用级别发布给平台用户, 提供多尺度, 多类型地理信息资源的综合利用和在线服务.

2) 在数据存储组织方式上, 天地图采用多分辨率金字塔瓦片技术, 即在 CGCS2000 经纬度坐标系统之下, 根据等经纬度球面剖分技术, 对地理空间数据进行分层分块组织, 各层的显示比例(即瓦片的地面分辨率)是固定的. 瓦片的划分如图 12 所示, 瓦片分块的起始点以从经纬度(-180°, 90°)开始, 向东向南行列递增. 从第 2 层开始, 上层的每一个瓦片作为四叉树的父节点, 即依次 4 等分地球表面. 兼顾传输调度两方面的效率, 每个影像瓦片大小被固定为 256×256 像素, 其数据格式为 PNG 或 JPG.

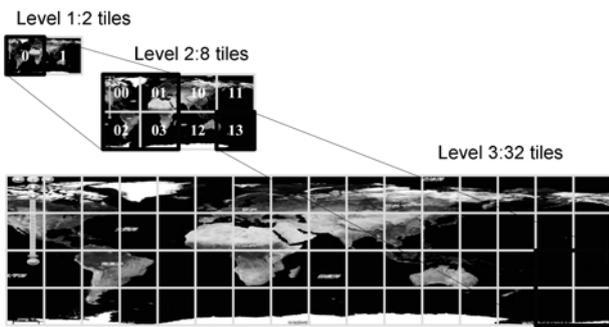


图 12 天地图遥感数据存储组织方案

3) 在数据管理上, 天地图采用商业数据库+文件的混合方式, 即支持数据库存储, 也支持大文件存储, 在瓦片 Morton 编码的基础之上, 构建出时空一体化的索引, 从而提供高性能的瓦片访问接口. 在服务模式上, 采用多服务器集群系统, 通过协同调和均衡负载, 可接入大规模用户的并发访问.

4) 在访问方式上, 天地图基于通用的 HTTP 协议, 对外采用门户网站和服务接口两种形式. 在服务器集群系统内部部署了 8 个地图数据服务器访问接口, 提供 24 小时不间断的在线服务, 满足每天 1000 万个页面浏览访问的能力.

2.2 中国资源卫星应用中心

中国资源卫星应用中心主要负责陆地卫星 CBERS-01/02/02B, HJ-1A/1B 等全部数据的长期归档保存和备份, 并随时供用户浏览, 检索和订购^[45, 46].

1) 在存储架构上, 卫星地面系统采用集中存储, 系统管理和分布式处理的分布式体系结构, 即由 PC 服务器集群与 SAN 存储系统构成的分布式体系结构 (在线数据采用磁盘阵列存储, 近线数据采用磁带库存储, 离线数据用磁带保存).

2) 在网络环境方面, 内部网络采用千兆交换网络, 系统外部采用百兆带宽接入, 内部与外部网络采用网闸隔离.

3) 在数据管理上, 数据实体按景组织存储, 元数据采用商业数据库系统(Oracle)管理, 数据检索访问服务采用 Web 方式; 数据产品采用 GeoTIFF 格式, 对外提供 2 级归档产品.

2.3 国家卫星气象中心

国家卫星气象中心的气象卫星数据存档和服务系统(SDAC)是目前国内遥感卫星数据规模最大的海

量存储系统之一, 负责 FY-1/2/3 系列风云卫星数据的处理, 存储与分发. 针对“新一代数据中心”的建设, 气象中心努力推动数据中心存储管理的自动化, 高可靠, 存储资源的无缝扩展与低能耗^[47~51].

1) 在存储架构上, 气象卫星数据存档和服务系统采用 SAN 与服务器集群存储. 其中在线数据磁盘阵列存储量为 364 TB, 近线数据磁带库存储量为 2.5 PB, 离线数据用磁带保存.

2) 在网络部署上, 通过在多套服务器之间部署 Infiniband 和捆绑的千兆网络光纤来实现内存之间直传的方式, 提升大规模共享内存, 提高大容量遥感数据的传输与处理速度.

3) 对于数据分幅, 如图 13 所示, 极轨卫星数据按卫星过境轨道为单位进行区域划分, 将我国大陆及周边地区按 5°×5°等间距分割为 62 个区域; 静止卫星数据以赤道为分界点进行南北半球数据区域分割,

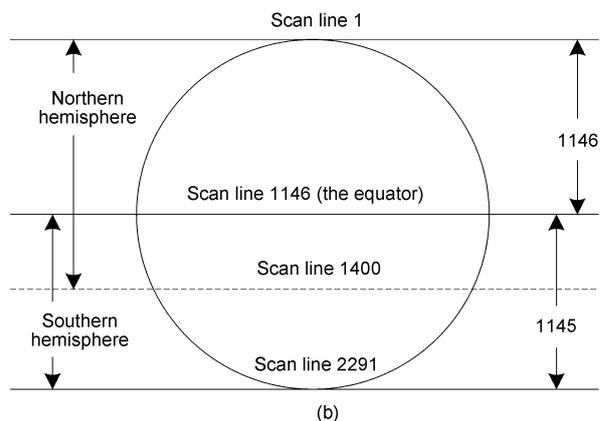
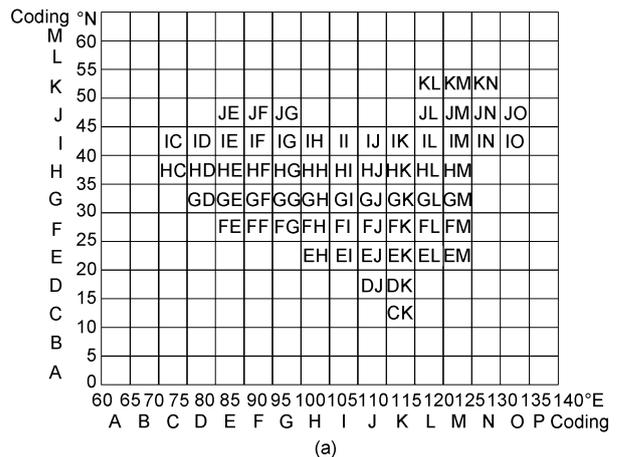


图 13 气象卫星数据分区示意图

(a) Data division for polar orbital satellites; (b) data division for geostationary satellites.

以第 1146 条扫描线作为分界线。

4) 在数据存储管理上, 系统采用 SQL Server 与 Sybase 企业级数据库管理, 数据实体按照条带组织, 卫星分类与日期分类编目; 卫星存档数据产品采用国际通用的科学数据格式 HDF. 系统运行状态为 7 d/24 h, 客户端采用 Web 访问方式。

5) 在海量遥感数据存储管理的工程建设上, 气象中心也面临着能耗压力严重的问题, 例如 2008 年电费超过 300 万元; 同时数据中心的散热问题也相当严峻, 安装更多的空调机柜也给机房空间造成压力。因此, 针对海量遥感数据的存储与管理, 能耗问题是数据中心建设时应该重点考虑的一个问题。

2.4 国家卫星海洋应用中心

国家卫星海洋应用中心地面应用系统负责存储与管理海洋卫星 HY-1A/1B(原始数据与 L0~3 级数据产品), 以及 NOAA 系列卫星与 EOS-MODIS 卫星原始数据^[52, 53]。

在存储架构上, 存储系统采用由千兆以太网交

换机连接构成的 NAS 三级存储体系: 一级存储采用光纤磁盘阵列在线存储; 二级存储采用大容量 SATA 盘阵; 三级存储采用模块化磁带库系统和 DVD 刻录系统(在线存储数据的备份)。在数据管理上, 系统采用以卫星和文件名称为主键的数据库(Oracle)管理方式。

3 国内外遥感数据存储中心或系统在数据存储管理上的综合比较与分析

综合国内外海量遥感数据存储管理技术状况, 如表 1 所示。

1) 按照物理存储架构划分, NASA EOS, Google Maps, Google Earth, Bing Maps, ESA, 天地图等属于在地域上逻辑上集中, 物理上分散的分布式服务器集群存储架构; 这种分布式存储架构主要应用于国家级超大规模数据存储综合中心的数据存储保障服务, 主要解决在现有不同业务存储体制和统一集中存储之间的矛盾; World Wind, TerraServer, GeoEye, 中国资源卫星应用中心, 国家卫星气象中心, 国家海

表 1 各个遥感数据存储中心或系统在数据存储管理技术上的综合比较

Storage center or system	Physical storage architecture	Data storage organization	Data format	Data storage management
NASA EOS	Distributed server cluster storage and three-level storage	Earth science disciplines and satellite orbital strip or scene	HDF-EOS	Commercial database and Linux file system
World Wind	Centralized server cluster storage	Tile layer based on the spherical grid and the Plate Carée projection	512×512 pixels, any image format (JPGE, PNG, DDS)	Distributed file system
Google Maps	Distributed server cluster storage and cloud computing	Quadtree-based tile layer and the Mercator projection	256×256 pixels (JPEG or PNG)	BigTable and GFS
Google Earth	Distributed server cluster storage and cloud computing	Tile overlay in the WGS84 and the Plate Carée projection	An factor of 2 between 256 and 2048 pixels (JPEG, PNG or GeoTIFF)	BigTable and GFS
Bing Maps	Distributed server cluster storage and cloud computing	Quadtree-based tile layer and the Mercator projection	512×512 pixels (JPGE or PNG)	Windows Azure and SQL Azure
Microsoft TerraServer	Centralized server cluster storage	UTM zone division and data tile	200×200 pixels (JPEG, GIF or TIFF)	Blob-based SQL Server databaser
ESA	Distributed server cluster storage and three-level storage	Satellite orbital strip or scene	CEOS, HDF, Geo-TIFF, and so on	Commercial database and file
Earth Simulator	Computing cluster	Computing data division according to the spherical grid	NetCDF	Parallel file system
GeoEye	Centralized SAN and Cluster	Satellite orbital strip or scene	TIFF, NITF, GeoTIFF, and so on	SAN file system
Map World	Distributed server cluster storage	Pyramid tile based on equal intervals of the latitude and longitude (CGCS2000)	256×256 pixels (JPEG or PNG)	Commercial database and file
CCRSDA	Centralized server cluster storage and three-level storage	Ground scene grid	GeoTIFF	Commercial database (Oracle) and file
NSMC	Centralized server cluster storage and three-level storage	Satellite orbital strip	HDF	Commercial database (Oracle /Sybase) and file
NSOAS	NAS-based three-level storage	Satellite orbital strip	HDF	Commercial database (Oracle) and file

洋应用中心等属于在地域上集中式服务器集群存储架构, 主要应用于部门级海量遥感数据存储中心的数据存储保障服务; *Earth Simulator* 在系统架构上属于计算集群. 在数据存储池的存储架构上, 以网络存储, 对象存储与服务器集群存储为基础的“三线”(在线, 近线, 离线)存储架构, 虽在一定程度上有效地解决了遥感数据访问速度与存储容量之间的矛盾, 但在实际业务应用中, 也存在着数据调度问题: 在线存储资源有限, 随着数据量的快速增长, 难以实现在线存储资源的动态扩展或按照空间区域特征的灵活配置; 大量数据处于近线和离线状态, 获取数据时, 迁移数据耗时, 无法实时在线直接访问和使用任意空间位置的数据. 另外, 云计算及基于云计算的云存储模式是海量数据存储和处理的一种最有潜力的解决途径, 但对于超大规模海量遥感数据的存储管理, 特别是高分辨率的遥感数据, 其在线备份冗余数据量庞大, 数据存储也没有考虑数据的空间分布特征, 在一定程度上不太利于遥感数据的区域性计算与处理. 因此, 现有的存储体系不仅要考虑将地球数据存储起来, 还需要建立全球尺度的地球数据存储模型, 结合遥感数据的空间区域特性和遥感数据的生命周期管理特征, 高效地管理与调度海量遥感数据.

2) 按照数据存储组织方式划分, *World Wind*, *Google Maps*, *Google Earth*, *Bing Maps*, 天地图等数据存储系统都属于基于球面格网的多分辨率金字塔瓦片, 主要应用于遥感数据的无缝组织和可视化视图, 解决基于影像的现实世界的真实表达与呈现, 但在“横向上”, 都欠缺同一区域的多源数据管理; *TerraServer* 虽然也是瓦片影像, 但它仅是某个区域带内的马赛克, 在“纵向”上没有建立多尺度的金字塔层级, 也存在对多源数据管理问题; *Earth Simulator* 在计算数据时将数据按照球面网格区域分块组织, 从某种意义上也形成了网格瓦片. *Geoeye*, *NASA EOS*, 中国资源卫星应用中心, 国家卫星气象中心, 国家海洋应用中心等都属于基于时空记录体系的卫星轨道条带或景存储管理方式. 但传统的时空记录体系, 即原始轨道数据按照接收时间顺序采用条带存储, 由于各个遥感数据生产单位之间的轨道条带与景缺少统一的分割标准, 产品数据标识缺少地学涵义, 同一地区的多源, 多尺度, 多时相数据之间缺少空间尺度与位置关联; 并且由于同一区域的多源数据也往往记录在不同的轨道条带中, 要想

大跨度或者跨部门整合一个特定区域的多源, 多时相数据, 非常耗时, 从而带来数据管理和整合的不方便. 相比之下, 利用一系列规则的, 无缝的, 具有多尺度层级结构的网格瓦片完整连续覆盖地球表面空间, 按照地球空间区域存储组织遥感数据, 有利于结合遥感数据的空间特性, 将遥感数据的实际应用服务与空间尺度和位置形成直接关联; 从而有利于形成基于球面剖分的地球空间位置标识和空间对象标识, 建立全球统一的空间存储基准和具有地学涵义的数据标识, 更好地存储与管理海量遥感数据.

3) 按照所存储管理的数据格式划分, *World Wind*, *Google Maps*, *Google Earth*, *TerraServer*, *Bing Maps*, 天地图等存储管理的遥感数据格式都是属于具有固定像素大小的瓦片影像格式, 主要应用于金字塔影像的快速显示; *NASA EOS*, *GeoEye*, *ESA*, 中国资源卫星应用中心, 国家卫星气象中心, 国家海洋应用中心等都属于基于卫星遥感数据产品格式, 主要应用业务产品管理.

4) 按照数据存储管理方式划分, *NASA EOS*, *World Wind*, *Google Maps*, *Google Earth*, *Geoeye*, *Earth Simulator* 都属于基于文件的文件系统管理方式; *TerraServer*, *Bing Maps* 属于基于 BLOB 数据类型的关系数据库管理; *ESA*, 天地图, 中国资源卫星应用中心, 国家卫星气象中心, 国家海洋应用中心都属于文件和商业关系数据库混合方式.

5) 超大规模存储系统的维护与能耗问题: 存储量达数十 PB 的超大规模存储系统, 其存储节点一般都达上千个, 存储规模扩大时, 能耗问题随之诞生. 现有的“三线”存储架构在提供数据服务时需要在线和近线的存储节点或盘阵都全在线运行, 耗能巨大. 因此, 需要建立合理的存储组织模型与存储架构, 根据用户区域访问的特性, 将遥感数据与存储资源关联起来, 形成需要哪个区域的数据, 哪个区域的存储资源就在线, 否则就关机或待机离线的按需全在线调度机制, 以支持系统维护和有效地节约能源.

因此, 针对我国的海量遥感数据存储问题, 应该采用一种什么样的数据组织与存储方式, 建立统一的空间存储基准, 更高效地存储 PB 级海量遥感数据, 在数据存储管理上根本性地提高海量遥感数据的整合, 共享, 快速访问与分发等综合管理能力, 实现按需直接全在线服务与应用, 同时高效地节约能耗, 是值得思考与研究的问题.

4 总结与展望

在系统存储架构方面, 通过综述和分析各个海量遥感数据存储管理系统的优点与优势, 结合当今3G, 下一代互联网, 云计算和云存储发展情况来看, 分布式集群化存储是海量数据存储技术的发展趋势, 同时, 遥感信息的“一站式”服务模式将成为主流。但海量遥感数据存储管理架构的关键在于全球遥感数据的存储组织模型与现代存储技术架构的结合, 建立基于空间位置为主导的存储管理架构, 形成一个逻辑上全球覆盖, 物理上分散存储, 信息高效共享的分布式集群存储体系。并且随着计算机技术和地学科学的发展, 应用于遥感信息领域的数据存储系统, 将更加地学专用化, 全球遥感数据存储视图的一体

化, 业务区划特征的定制化与个性化, 用户操作的简易化, 存储资源配置的灵活化, 以及系统易管理与低能耗化。

那么, 在存储组织模型方面, 结合我国测绘体系的大量研究成果, 根据国内目前的遥感数据组织形式以及发展趋势看, 在我国目前和将来相对长的一段时间内, 对全球遥感数据采用经纬度进行组织, 局部区域或者平面遥感数据采用高斯平面数据组织, 这种组织形式不会产生很大的变化。因此, 根据我国的国情, 在实际应用中建立基于等经纬格网球面剖分体系, 同时兼顾地图分幅和百公里网格的地球剖分框架, 是实现全球海量遥感数据统一存储模型的一种有效途径。

参考文献

- 1 陈述彭, 郭华东. “数字地球”与对地观测. 地理学报, 2000, 55(1): 8-14
- 2 李德仁. 摄影测量与遥感学的发展展望. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(12): 1211-1215
- 3 李德仁, 邵振峰. 论新地理信息时代. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(6): 579-587
- 4 王家耀. 地图制图学与地理信息工程学科发展趋势. 测绘学报, 2010, 39(2): 115-118
- 5 陈军等. 地理信息公共服务平台的总体技术设计研究. 地理信息世界, 2009, 6(3): 7-11
- 6 程承旗, 关丽. 基于地图分幅拓展的全球剖分模型及其地址编码研究. 测绘学报, 2010, 39(3): 295-302
- 7 程承旗, 吕雪峰, 关丽. 空间数据剖分集群存储系统架构初探. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 47(1): 103-108
- 8 Esfandiari M, Ramapriyan H, Behnke J, et al. Evolving a ten year old data system. In: Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06). Pasadena, California: IEEE, 2006. 243-250
- 9 Esfandiari M, Ramapriyan H, Behnke J, et al. Earth observing system (EOS) data and information system (EOSDIS)-evolution update and future. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007). Barcelona: IEEE, 2007. 40005-40008
- 10 Behnke J, Watts T H, Kobler B, et al. EOSDIS petabyte archives: tenth anniversary. In: Proceedings of the 22nd IEEE/13th NASA Goddard Conference on Mass Storage Systems and Technologies (MSST'05). Monterey, California: IEEE, 2005. 81-93
- 11 Ramapriyan H K, Pfister R, Weinstein B. An overview of the EOS data distribution systems. Rem Sens Dig Imag Proc, 2011, 11(3): 183-202
- 12 Ilg D, Wynne D, Gejjagaraguppe R, et al. HDF-EOS library user's guide for the ECS project, volume 1: overview and examples. Tech Paper 170-TP-500-001. 1999
- 13 Wei Y X, Di L P, Zhao B Z, et al. Transformation of HDF-EOS metadata from the ECS model to ISO 19115-based XML. Comp Geosci, 2007, 33: 238-247
- 14 Mitchell A, Ramapriyan H, Lowe D. Evolution of Web services in EOSDIS-search and order metadata registry (ECHO). In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2009). Cape Town, South Africa: IEEE, 2009. 371-374
- 15 Kempler S, Lynnes C, Vollmer B. Evolution of information management at the GSFC earth sciences (GES) data and information services center (DISC): 2006-2007. IEEE T Geosci Remote, 2009, 47(1): 21-28
- 16 Boschetti L, Roy D P, Justice C O. Using NASA's World Wind virtual globe for interactive internet visualization of the global MODIS burned area product. Int J Remote Sens, 2008, 29(11): 3067-3072
- 17 Bell D G, Kuehnel F, Maxwell C, et al. NASA World Wind: opensource GIS for mission operations. In: Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2007. 1-9
- 18 Gibin M, Singleton A, Milton R, et al. An exploratory cartographic visualization of London through the Google Maps API. Appl Spat Anal

- Pol, 2008, 1(2): 85–97
- 19 Sample J T, Loup E. Tile-base geospatial information system: principle and practices. New York: Springer, 2010. 23–200
- 20 Guo W, Gong J Y, Jiang W S, et al. OpenRS-Cloud: a remote sensing image processing platform based on cloud computing environment. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53(suppl. 1): 221–230
- 21 Ghemawat S, Gobiuff H, Shun-Tak L. The Google file system. In: *Proceedings of the Nineteenth ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP'03)*. Bolton Landing, New York: IEEE, 2003. 1–15
- 22 Dean J, Ghemawat S. MapReduce: simplified data processing on large clusters. *Commun ACM*, 2008, 51(1): 107–113
- 23 Chang F, Dean J, Ghemawat S, et al. Bigtable: a distributed storage system for structured data. *ACM T Comput Syst*, 2008, 26: 1–14
- 24 Martino S D, Bimonte S, Bertolotto M, et al. Spatial online analytical processing of geographic data through the Google Earth interface. *Geoc Sust Env Plann*, 2011, 348: 163–182
- 25 Dean J, Ghemawat S. MapReduce: a flexible data processing tool. *Commun ACM*, 2010, 53(1): 72–77
- 26 Schwartz J. Bing Maps Tile System. <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb259689.aspx>
- 27 Pendleton C. The World according to Bing. *IEEE Comp Gra Appl*, 2010, 30(4): 15–17
- 28 Redkar T. Windows Azure Platform. New York: Apress, 2009. 53–104
- 29 Wu C, Fraundorfer F, Frahm J M, et al. Image localization in satellite imagery with feature-based indexing. In: *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing: ISPRS, 2008. Vol. XXXVII. Part B3a: 197–202
- 30 Barclay T, Gray J, Ekblad S, et al. Designing and building TerraService. *IEEE Internet Comput*, 2006, 10(5): 16–25
- 31 Barclay T, Chong W, Gray J. “TerraServer Bricks—a high availability cluster alternative.” Microsoft Technical Report MSR-TR-2004-107, 2004
- 32 Barclay T J G. TerraServer SAN-Cluster architecture and operations experience. Microsoft Technical Report MSR-TR-2004-67, 2004
- 33 Barclay T, Gray J, Slutz D. Microsoft TerraServer: a spatial data warehouse. In: *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. Dallas, Texas: ACM, 2000. 29(2): 307–318
- 34 Albani S, Giaretta D. Long-term preservation of Earth observation data and knowledge in ESA through CASPAR. *Int J Dig Cur*, 2009, 4(3): 4–16
- 35 Fusco L, Cossu R. Past and future of ESA Earth observation grid. *Mem S A It*, 2009, 80: 461–476
- 36 Beruti V, Forcada M E, Albani M, et al. ESA plans—a pathfinder for long term data preservation. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Preservation of Digital Objects (iPRES2010)*. Vienna, Austria: OAI, 2010. 1–6
- 37 Nakano T, Kawase Y, Yamaguchi T, et al. Parallel computing of magnetic field for rotating machines on the Earth Simulator. *IEEE Trans Magn*, 2010, 46(8): 3273–3276
- 38 Nakajima K. Preconditioned iterative linear solvers for unstructured grids on the Earth Simulator. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on High Performance Computing and Grid in Asia Pacific Region (HPCAsia'04)*. Omiya Sonic City, Tokyo: IEEE, 2004. 150–159
- 39 彭新东, 李兴良. 多尺度大气数值预报的技术进展. *应用气象学报*, 2010, 21(2): 129–136
- 40 Habata S, Yokokawa M, Kitawaki S. The Earth Simulator system. *NEC Res Dev*, 2003, 44: 21–26
- 41 Itakura K. MDPS: The new mass data processing storage system for the Earth Simulator. *J Earth Sim*, 2006, 5: 20–24
- 42 Investor Presentation by GeoEye. http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/investor-relations/Investor_Presentation_JPMorgan_05_17_10.pdf
- 43 Simplified Digital Archiving for Remote Sensing. <http://www.quantum.com/Solutions/IndustrySolutions/Government/Index.aspx>
- 44 Gong J Y, Xiang L G, Chen J, et al. Multi-source geospatial information integration and sharing in Virtual Globes. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53(suppl. 1): 1–6
- 45 Wu X, Guo J, Wallace J, et al. Evaluation of CBERS image data: geometric and radiometric aspects. *Inn Rem Sens Phot*, 2009, 2: 91–103
- 46 王峰. 资源卫星数据地面存储管理系统的设计与实现. *航天器工程*, 2009, 18(3): 66–71
- 47 赵立成, 王素娟, 施进明. 国家卫星气象中心信息共享体制研究与技术实现. *应用气象学报*, 2002, 13(5): 627–632
- 48 钱建梅, 郑旭东. 国家卫星气象中心气象卫星资料存档系统. *应用气象学报*, 2003, 14(6): 756–762
- 49 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. *气象学报*, 2009, 67(4): 501–509
- 50 许健民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用. *气象*, 2010, 36(7): 94–100
- 51 贾树泽, 杨军, 施进明. 新一代气象卫星资料处理系统并行调度算法研究与应用. *气象科技*, 2010, 38(1): 96–101
- 52 白照广, 李一凡, 杨文涛. 中国海洋卫星技术成就与展望. *航天器工程*, 2008, 17(4): 17–23
- 53 王红, 彭海龙. 海洋一号卫星离线数据长期归档方法研究. *海洋通报*, 2008, 27(4): 98–100