系统模型与问题表述

1. 系统描述

整个模型由图所示，在近地轨道上有数颗卫星，在每个卫星上配备一台云服务器。在空中端，有数架无人机在空中等待用户或者卫星卸载或上传服务，在地面端，有多个移动设备组成。

也就是说整个模型可以抽象成卫星-空中-地面的模型。假设在卫星端有颗近地轨道卫星，令卫星为,其中，在空中端，有架无人机在空中，其中∈，在地面端，系统包含个地面用户其中。假设每一架无人机和每一颗卫星都配备了一台服务器，使得卫星或者无人机能够为地面的用户提供服务。

2.计算模型

2.1无人机与地面用户通信模型

在地面端，移动设备会处理一些复杂任务，如实时图像识别或者车联网等延迟要求较高的任务。由于计算能力或者存储容量等限制，需要将这些复杂任务抽象成多个子任务上传到无人机上进行。这些复杂任务在执行时候都存在有依赖关系，也就是说在完成某一个子任务前，需要把前置任务完成才能够执行该子任务，将多个子任务抽象成有向无环图（DAG）。令，其中表示有个子任务的节点集合，表示在这些子任务间有条依赖关系边的集合。在有向无环图中，每个顶点集表示为，每个节点表示某个特定的子任务，节点间的边代表子任务之间的依赖关系。边表示任务必须在任务开始之前完成。每个子任务可以表示为四元组，其中表示的是子任务启动前需要接受的数据量，表示的是子任务完成后的输出结果，也可以作为后续子任务的输出，表示的是处理子任务所需要的CPU周期数，也就是说处理子任务的计算量，表示的是依赖的特定服务。

若子任务在地面用户的设备上处理，那么设是执行所需要的CPU周期数，设是地面用户的计算能力。是对应芯片的有效电容系数，对应地面用户的设备能耗为



如果地面用户设备的复杂应用程序上传到无人机时，根据莱斯信道公式可得地面用户和无人机间的信道系数可以表示为：



其中表示的是Rician因子，表示的是直射路径（LoS）和多径散射（NLoS）功率的比值，指的是直射路径的信道系数，是多径散射的信道系数。

根据香农公式，从地面用户设备到无人机的上行传输速率定义为



其中，以及分别表示为系统宽带，移动设备的发射功率和噪声功率，于是将子任务从地面用户设备到无人机的传输时间可以表示为



其中表示的是子任务的数据量的大小，表示的是瞬时是上行传输速率。那么知道了子任务从地面用户到无人机的传输时间，于是我们可以得到相应的传输能耗为



其中是移动设备的发射功率。

当地面用户有复杂应用程序需要进行卸载到无人机上时，例如实时图像识别，设置为复杂应用程序的集合，为应用程序的数量。令无人机具有用于处理若干子任务的硬件条件，并且在无人机上提前安装好用于处理子任务的必要的服务程序，当有子任务上传到无人机时，无人机上的服务程序会将子任务安装到自带的磁盘上。在每架无人机上有个处理器核心，且如果子任务间没有依赖关系，那么这些处理器可以同时处理多个子任务。将无人机定义成五元组 ，其中是由无人机收集的依赖任务集合，表示在无人机处理子任务时，第个处理器核心的最大的计算频率。表示在无人机处理子任务时，第个处理器核心在最大频率下的功耗。表示无人机向近地轨道卫星上传数据时的发射功率，表示无人机从近地轨道卫星接收数据时的功耗，令每个核心有种不同的计算频率级别，令最大值等于1，最小值大于0。若第个处理器的计算频率为，则处理器的实际计算频率为。实际的功耗为 , 表示无人机的有效电容系数，， 表示无人机在其第个核心上执行子任务的实际能耗。指的是无人机采用第个核心的最大计算频率执行子任务的最小执行延迟



无人机执行所有子任务的能耗总和为



其中表示的是任务图中的子任务数量，表示任务图中第个子任务的能耗，表示无人机在其第个核心上执行子任务的实际能耗。是指示函数，若，说明子任务在无人机核心上执行。

若无人机使用第个处理器核心执行子任务时，其实际执行延迟由以下公式定义：



其中表示核心以最大计算频率执行子任务的最小理论延迟，表示的是处理子任务所需要的CPU周期总数，即处理子任务的计算量，时动态频率调节系数，反映的是当前核心频率与最大频率的比值，指的是无人机第个核心处理器的峰值计算频率。

在子任务执行期间，设子任务的就绪时间为，设子任务在WDC也就是无限下行通道上的完成时间为。设子任务在无人机上的完成时间为，设在WUC也就是无线上行通道上的完成时间为，设表示调度子任务时无人机的空闲时间，设表示在无线上行通道上资源的空闲时间。设表示在无限下行通道上资源的空闲时间

子任务的就绪时间由所有的父任务的完成时间决定

.

其中指的是子任务的直接父任务集合，指的是父任务在无人机本地执行的完成时间，指的是如果父任务被卸载导低空轨道卫星上执行，那么需要其输出数据通过无线下行通道(WDC)返回到无人机的时间。

子任务在无人机上的完成时间由两部分决定



其中指的是分配给的处理器核心的空闲时间（即核心何时可用），指的是子任务在第个核心处理器上的实际执行延时。

1.2无人机与卫星通信模型

由于卫星在围绕着地球高速运动，卫星在地球上空覆盖无人机的时间窗口是有限的，也就是说，卫星在为无人机进行任务卸载的服务时间是有限的。将卫星与无人机的位置抽象在同一个平面，以地面为原点建立平面直角坐标系，以无人机高度水平延伸出与轴水平的水平线，此时卫星与无人机延伸出去的水平线的夹角为



其中指的是地球半径，指的是卫星轨道的高度，指的是无人机到卫星的直线距离。当卫星在无人机上空运行过一段时间后，卫星与无人机间的夹角是一直在变化，在变化过程中，夹角为有一个从大到小的过程，令卫星能够为无人机提供服务的最低夹角为，也就是说当卫星与无人机间的夹角小于这个阈值时，该卫星将停止对无人机的服务。可以表示为



于是近地轨道卫星覆盖时间内的弧长为：



对应无人机和近地轨道卫星之间的有效通信时间为



其中指的是近地轨道卫星的运行速度。在这种情况下由于无人机的地空距离远远小于地面与卫星的距离，于是我们在这里不考虑无人机的地空距离。

在一定的时间范围内，设一颗近地轨道卫星只能给一架无人机提供服务，无人机和近地轨道卫星的信道系数如下所示，



其中是近地轨道卫星的波束增益，表示的是信号波长，表示的是无人机和近地轨道卫星之间的距离。表示的是信道的相位偏移，其中是虚数单位，表示的是相位偏移的角度。由于卫星通信中的传输延时，我们考虑的过时信道状态信息(CSI)。因此得到



其中，用来衡量信道状态信息的时效性，是第一类零阶贝塞尔函数，用于计算时间相关性，是最大多普勒频率，也就是说无人机与卫星之间的相对运动会导致信号频率的变化。是无人机和近地轨道卫星之间传输的延迟。表示信道的噪声部分，通常为一个复高斯随机变量。其方差和相同，则和之间的上传速率由以下公式得出



其中指的是无人机与卫星之间的上行链路传输速率。指的是无人机与卫星之间的信道宽带。指的是无人机的发射功率。指的是无人机与卫星之间信道系数。指的是来自于其他无人机群的干扰综合，其中a表示其他无人机的索引，是其他无人机与卫星之间的信道系数。指的是卫星处的加性高斯白噪声（AWGN）的方差。

无人机与卫星通信：令表示无人机的部分卸载因子，当＜1时候，将部分任务卸载到低轨卫星时，此时令二进制变量为。否则，计算任务卸载到低轨卫星上的传输时间可表示为

  
在这个式子中，表示为信号从无人机传输到低轨卫星的物理传播时延，表示的是无人机到卫星之间的距离，指的是光速，指的是实际数据从无人机上传到卫星所需要的时间，指的是传输开销因子，通常，和分别指的是地面用户对子任务的本地计算比例和无人机对子任务的本地计算比例

其中无人机和近地轨道卫星之间传输的能耗可以表示为



其中指的是无人机的发射功率，指的是子任务的输入数据大小，指的是无人机与卫星的上传链路传输速率。

此外子任务在处的计算执行时间为



其中指的是子任务完成所需要的总CP周期数，取决于任务的复杂度。指的是卫星分配给子任务的计算资源，也就是CPU频率。近地轨道卫星执行子任务的计算能耗为



其中指的是能耗系数，取决于卫星处理器架构。每颗近地轨道卫星可以通过卫星间的通信链路和其他近地轨道卫星共享来自地面用户的信息。和之间信道速率为



其中指的是分配卫星间链路的宽带，指的是发射信号的功率， 表示的是玻尔兹曼常数，表示的是接收端系统的等效噪声的系数，指的是卫星和之间的距离，指的是载波频率，指的是光速。

（多卫星）当＜1，可以将剩余的计算任务卸载到其他近地轨道卫星和云服务器，假设只能对给定任务进行一次卸载。因此，如果将剩余计算任务卸载到另一颗近地轨道卫星上。=1传输时间为



其中表示的是和之间距离，代表的是传输开销因子，表示的是卫星对子任务的部分卸载因子。表示的是子任务的输入数据的大小，和卫星之间传输的能耗表示为



其中指的是发射功率

子任务在处的计算执行时间为



其中指的是另一个卫星分配给子任务的计算资源，处的计算能耗表示为



1.3云服务器模型

当近地轨道卫星接入云服务器，卸载任务时，云服务器部署在地面上，且设每颗卫星只能接入一台云服务器，卫星与云服务器之间的传输速率为



＜1时以及把剩余任务卸载到云服务器时，假设配对二进制变量为，则传输时间为



与之间的传输能耗表示为



此外，任务在处的执行时间为



在处的计算能耗表示为



问题描述

令表示中所有子任务的调度顺序向量，其中是中要执行的第个子任务，令表示中所有子任务的调度位置向量，其中是子任务的执行位置。如果, 在无人机的第个核心上执行，否则会调度到卫星链路上执行任务，。基于和，我们将 表示为的任务调度向量。令 表示无人机的资源分配向量，其中是分配给无人机的计算资源比例，且。令表示多接入边缘计算系统的所有服务程序的服务缓存向量，其中 是第个服务程序的缓存决策。 若，则第个服务程序被缓存于近地轨道卫星上，否则

由于复杂应用程序从地面用户上传到近地轨道卫星的时延远远大于从近地轨道卫星返回到地面用户的时延，于是我们可以不考虑当子任务处理完返回到地面用户设备上的时延。平均执行延迟（AED）由下式：



该式子表达的子任务的延时的计算方式，其中指任务在本地（地面用户）上的计算时间，指的是任务从地面用户 卸载到无人机  的传输时间加上在无人机上的计算时间。指的是任务从  卸载到 ​，再从 ​ 卸载到卫星  的传输时间加上在卫星上的计算时间。指的是任务从  卸载到 ​，再到 ，然后通过星际链路（ISL）卸载到另一颗卫星的传输时间加上在  上的计算时间。指的是任务从  卸载到 ，再到，然后卸载到云服务器 的传输时间加上在云服务器上的计算时间。于是我们设平均执行延迟为：



平均能耗（AEC）由下式：



这个公式描述了子任务的总能耗，它由多个部分组成，分别对应不同计算节点和通信链路上的能耗，指的是从地面用户设备本地执行子任务的计算能耗；指的是子任务从地面用户设备传输到无人机的通信能耗；指的是无人机执行子任务的计算能耗总和。指的是子任务 从无人机传输到近地轨道卫星的通信能耗；指的是近地轨道卫星执行子任务的计算能耗；指的是子任务从一颗近地轨道卫星传输到另一颗卫星的通信能耗；指的是另一颗近地轨道卫星执行子任务的计算能耗；指的是子任务 从近地轨道卫星传输到云服务器的通信能耗。指的是云服务器执行子任务 的计算能耗。于是我们设平均能耗为：



此外,假设在本文提出的模型上将子任务上传运行，令无人机，卫星及云服务器的收费统一。当子任务要在本文提出的模型上执行时,通过与多接入云边缘计算(MEC)系统运营商协商费用，随后运营商将向地面用户设备收费。因为它租用了云服务器、无人机及卫星的计算资源来执行该任务。使用费用是根据计算能力下的每时间单位价格计算，定义为其中 和是两个系数，在该模型上执行任务的成本可通过以下方式获得



所以目标函数应该为：



约束条件：













第一个式子表示的是每个计算节点的资源分配不能超过其最大计算能力，每个子任务只能被卸载到一个计算节点（无人机、卫星或云服务器）：其中 为二进制变量，表示子任务是否卸载到节点， 为所有可用计算节点的集合。第二个式子表示的是每个计算节点的资源分配不能超过其最大的计算能力其中 为节点 分配给子任务 的计算资源（如CPU周期数），​ 为节点  的最大计能力。第三个式子表示的是子任务的执行必须在其所有父任务完成后才能开始其中 为子任务 的父任务集合，和  分别为子任务的开始时间和父任务的结束时间。第四个式子表示的是无人机与卫星的通信时间受卫星覆盖窗口限制其中为卫星 对无人机  的最大覆盖时间。第五个式子表示的是无人机的总能量消耗不能超过其电池容量其中 为无人机 处理子任务的能耗，为无人机  的最大能量。第六个式子表示的是每个子任务的完成时间不能超过其截止时间。