

卫星通信系统中功率与时隙资源联合分配算法

韩寒^{1,2}, 李颖², 董旭³, 国晓博⁴, 黄勤飞⁵

(1. 解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007;
2. 中国电子设备系统工程公司, 北京 100141; 3. 解放军西安通信学院, 陕西 西安 710000;
4. 中国电子科技集团第54研究所, 河北 石家庄 050081; 5. 北京首都公路发展集团, 北京 100073)

摘要: 提出联合优化卫星通信系统中的功率和时隙资源的方法, 以提高星上有限资源的使用能效。挖掘了功率和时隙资源在容量提升上的相互补充相互依存关系, 考虑了多个地球站的信道条件和容量需求的差异性, 建立了资源联合分配的状态组合模型, 以适应各地球站的多资源利用模式。并以最大化能效为目标, 设计了联合分配的迭代对偶优化 (IDO) 算法, 以较低复杂度获得了最优联合分配方案。仿真分析表明, 资源联合优化比非联合优化提高了能量利用效率, 尤其在频率资源 (载波数目) 较少时优势更加明显。

关键词: 卫星通信; 功率分配; MF-TDMA; 时隙分配; 联合优化

中图分类号: TN915.81

文献标识码: A

文献编号: 1000-436X(2014)10-0023-08

Algorithm on joint optimization of power allocation and slot allocation in satellite communication systems

HAN Han^{1,2}, LI Ying², DONG Xu³, GUO Xiao-bo⁴, HUANG Qin-fei⁵

(1. College of Communication Engineering, PLA UST, Nanjing 210007, China;
2. Institute of China Electronic System Engineering Corporation, Beijing 100141, China;
3. Xi'an Communication Institute, PLA, Xi'an 710000, China; 4. No.54 Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;
5. Beijing Capital Highnag Development Group Co., Ltd., Beijing 100073, China)

Abstract: An algorithm to jointly optimize the power allocation and the slot allocation in order to improve the utilization efficiency of the limited resources on the satellite was proposed. The basic principles of the mutual compensation and mutual independence between these two resources are explored to pave the way for joint optimization. Considering the differences about each station's channel condition and capacity requirement, a state-combination model for optimally allocating the resources is setted up, so as to adapt the multi-resource usage pattern with each earth station. Targeting at the energy efficiency, an iterative dual optimization algorithm is proposed, and the final optimal policy for resource allocation with low complexity is obtained. With the simulation and analysis, the proposed joint optimization is verified to perform better than the non-joint ones in the perspective of the energy efficiency, especially when the frequency resource (the carrier number) is less.

Key words: satellite communication; power allocation; MF-TDMA; slot allocation; joint optimization

1 引言

卫星^[1]多址接入技术中 MF-TDMA 机制以其灵

活的组网优势可以实现多种业务、多种站型的混合组网, 得到卫星工业界和学术界的广泛关注。该接入方式基于时间划分和频率划分相结合的二维多址

收稿日期: 2014-06-30; 修回日期: 2014-09-01

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2012M512075); 国家自然科学基金重点基金资助项目(61231011, 61032004, 91338201); 国家高技术发展计划(“863”计划)基金资助项目(2012AA121605)

Foundation Items: China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2012M512075); The National Natural Science Foundation of China (61231011, 61032004, 91338201); The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA121605)

接入技术, 接入站点可以通过动态申请资源获得不同速率的传输权限。其主要特点包括: 同载波的不同 TDMA 时隙可以传输不同速率信息; 不同速率的接入站点可以通过速率跳变实现互联互通。灵活的时频资源利用模式也带来了诸多系统实现上的不便, 比如需要在多个载波上实现全网同步以及更复杂的带宽分配算法。但这些不足之处将随着相关技术的改进而逐渐淡化, MF-TDMA 在频率资源短缺的卫星通信系统中的优势将更为突出。

另一方面, 卫星中功率资源受限已是目前制约卫星通信技术往网络化、空天地一体化、信息速率高速化发展的严重障碍。另外, 与地面骨干节点最为不同的是, 卫星需要太阳能和蓄电池联合交替供电。以同步卫星为例, 每年约有 90 天会有日蚀出现, 最长持续时间可以达到 72 min 之久, 在该时间内只能依靠能量有限的蓄电池供电。在电池供电期间, 功率受限问题将转换为能量受限问题, 直接关系到通信持续时间长短, 在业务量剧增的将来也会是又一大瓶颈问题。

时频资源功率资源的有限性同时存在是卫星通信系统区别于地面系统的显著特点。为更加高效地利用两大受限资源, 联合设计将是必由之路。实际上功率和时频资源是相互补充、相互依存的, 较大发射功率可以增强接收信噪比, 从而降低系统对时频资源的依赖, 如波束成形; 而较多时频资源同样可以减小对功率的需求, 如超宽带通信。联合设计将带来卫星中容量的提升和载荷的降低, 尽管需要更多的信息交互和联合控制, 但是前景依然十分诱人可观。

本文以卫星上电池供电为背景, 以能量节约为牵引, 在 MF-TDMA 多址接入场景中研究功率和时频资源(后文中将具体化为时隙资源)的联合优化问题。通过对两者互补关系的探讨, 建立联合设计的模型框架, 并综合考虑用户信道条件、用户容量需求等方面的异构性, 在严格的功率受限和时频资源总量受限的基础上运用凸优化等数学工具设计了最佳的联合优化算法。最后对算法的性能进行了仿真分析, 验证了联合优化的优势。

2 相关工作

卫星中 MF-TDMA 技术可以运用在多种卫星体制中, 文献[2]给出了该技术详细的使用分类。该技术在透明转发体制中通常在上行和下行链路同时使

用; 在处理转发体制中为避免下行链路多载波的功率回退等问题, 通常只应用于上行链路, 下行链路多采用时分复用 TDM 方式。时隙资源的分配在 MF-TDMA 中处于重要的地位, 直接决定了资源的利用率和用户的 QoS。现有的文献多将该问题定位为装包(BPP)问题, 并结合卫星需求进行理论研究。文献[3]在 BER 需求下计算各终端需求的时隙数目, 以最小化时隙碎片数量为目标提出了 RCPfit 算法。文献[4]分别考虑了波束间和卫星间干扰给时隙分配带来的约束, 结合空间复用技术探讨了可实现吞吐量最大化的时隙分配策略。文献[5]在 DVB-RCS 中研究了不同类型的带宽请求下基于效用函数的 TAP 分配问题, 并提出了时隙数目分配后进行时隙位置分配的简化算法。针对时隙分配中的多层次现象, 文献[6]提出了 area-segment-RCST 三级分配原则, 设计了按需带宽分配(DBA)算法, 并依据物理层编码速率改变时隙长度以此进一步提高时频资源利用率。这种自适应 TDMA 的思想利用了时长和码速率的互补原理, 多用于 Ka 频段对抗雨衰等恶劣信道环境^[7]。文献[8]基于跨载波时隙分配问题, 提出了基于平衡二叉树信道分配模型, 有效地满足了 GMPRS 标准对信道分配的实时性与资源利用率的要求。但现有 MF-TDMA 中时频分配与功率分配相结合的研究甚少, 文献[9]探讨了因频繁时隙请求造成的终端接入能耗升高的问题, 亦与本文研究不符。

卫星中功率控制技术从主控方位置角度可划分为上行功率控制、下行功率控制和上下行联合功率控制; 从参与调控的链路数目上可划分为单链路功率控制和多链路功率控制。上行功率控制多用于抑制上行单链路信道衰落, 使卫星端接收 SINR 达到解调门限, 如文献[10,11]。文献[12,13]研究了下行多波束间的功率控制, 目标是在功率总和受限下最大化服务用户数目, 同样是以地面接收终端 SINR 达到解调门限为标准。另外一些研究建立在理想信道容量基础上, 以容量性能作为功率分配的指标。文献[14,15]考虑下行多波束的链路条件和容量需求, 在功率总和约束下联合设计各个波束的下行发射功率。文献[16,17]进一步将功率和带宽联合分配, 以减小波束间干扰提高信道容量和能量效率。可以看出, 现有关于功率分配的文献均缺乏时间维度的考虑, 失去了资源更优配置的可能。

3 系统模型

系统模型如图 1 所示, 在单波束透明转发体制

下，上下行均采用 MF-TDMA 多址接入方式服务 K 个固定地球站用户（覆盖区内的通信流量均经固定地球站与卫星交互）。各地球站占用不同的“载波-时隙”资源块进行数据发送和接收，并通过“收跳发不跳”方式相互通信。各固定地球站在地理位置上相互分离，保持严格时间同步，并经控制链路相连到卫星网络控制中心（NCC）。卫星可用带宽被划分为 N 个载波（ $N < K$ ），各载波功率可以独立控制。

本文研究卫星处于日蚀周期，使用蓄电池供电时的资源联合分配问题。设卫星上 ERIP 值为 P_{tot} ，该功率值在多载波间配置；设载波 c （ $c=1,2,\dots,N$ ）的功率为 P_c ，不考虑载波间干扰和多载波的功率回退问题，有 $\sum_{c=1}^N P_c \leq P_{tot}$ 。由于固定地球站可由地面电缆供电，故本文只关注星上能耗问题。

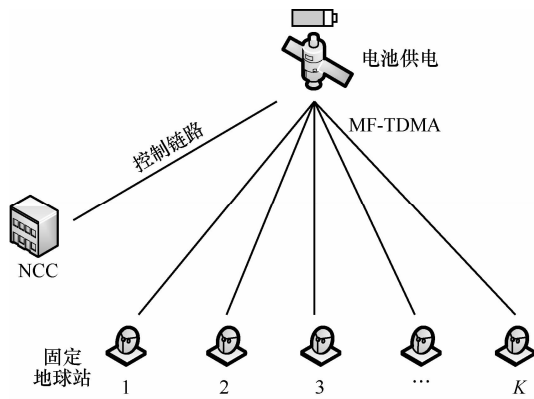


图 1 系统模型

卫星到用户 k 的链路容量以理想香农容量公式近似表示为

$$R_k = B \log(1 + P^T g_k) \quad (1)$$

其中， B 为该用户使用的载波带宽， P^T 为卫星在该载波上的发射功率， g_k 为该链路的传播增益。考虑卫星天线增益 G^T 、路径损耗 h_k 及噪声功率 N_0 ，该传播增益又被称为有效信噪比^[16]（CNR, effective channel-to-noise ratio），表示为

$$g_k = G^T |h_k|^2 / (BN_0) \quad (2)$$

该 CNR 值可以由地球站通过导频信号测量获取。由于雨衰等信道环境的差别，不同位置的地球站的 CNR 值可能不同，导致相同的卫星发射功率下信道容量不尽相同。另外不同的地球站的容量需求（传输流量）不尽相同，超帧时长 T 内的平均流量表示为

$$C_k = \int_{t=0}^T Traf_k(t) dt, k=1,2,\dots,K \quad (3)$$

该值可由各地球站依据流量变化提前估计得出。

假定 MF-TDMA 中超帧时长 T 为资源分配间隔，当前超帧的传输期间为下一超帧进行资源配置。另对资源配置作以下假设：1) 为简化问题复杂度，假设各载波带宽相同，且同一地球站不能同时占用 2 个及 2 个以上载波；2) 每载波每次只能供一个地球站使用，多个地球站可以分时复用 1 个载波；3) 同一超帧内，一个地球站可以使用多个载波上的离散的多个不等长度的时隙资源（将这些时隙资源再度分给该地球站的多个连接）；4) 卫星上功率调整速度较快，该耗时可以忽略。

卫星资源分配流程可以简单描述为：1) 下一超帧开始前各地球站向 NCC 上报各自容量请求 C_k 以及卫星链路 CNR 值；2) NCC 计算各地球站的功率资源和时隙资源；3) NCC 将分配结果以突发时间计划 TBTP 形式下发给各地球站；4) 各地球站按照卫星发射功率选定相应的调制编码方式进行该超帧内的数据传输。

4 问题建模

4.1 2D-BPP 问题的变种

本节以装包理论（2D-BPP, 2-dimension bin packing problem）建模该能量节约问题。将超帧时长归一化为 $T=1$ ，则超帧时间内最大的可用电池能量为 P_{tot} 。定义长度为 P_{tot} ，宽度为单位时间 T 的“能量块”为待装容器，各地球站所需能量块为 BPP 问题中的货物。货物的长度表示分配给该地球站的卫星发射功率，宽度表示分配给该地球站的 MF-TDMA 的时隙长度（小于归一化超帧长度 1），重量表示分配给该地球站的吞吐量（一个超帧内传输的数据总量，超帧归一化后该值等于 C_k ）。不同于传统 BPP 问题中的货物尺寸固定这一前提，本问题中货物“重量”固定，长度和宽度参量可以调节。装包目标为最小化总货物所占空间，即等效为最小化能耗。需要说明的是，该问题有以下 2 个额外的约束条件。

1) 并排放置的货物总数不能超过 N 个，即每一时刻同时进行传输的地球站数目不能超过载波数目；

2) 货物不仅在长度和宽度上可以调整，还可以拆分，只需满足以下重量守恒的拆分条件，该约束

等效为第 3 节中资源配置的假设 3)。

货物拆分条件为

$$\sum_{m=1}^{M_k} \tau_{m,k} \log(1 + p_{m,k} g_k) = C_k \quad (4)$$

其中, M_k 为货物 k 拆分成的子货物的数目, 对应的 $p_{m,k}$ 和 $\tau_{m,k}$ 分别为各子货物的长度和宽度。该问题称之为 2D-BPP 问题的变种, 在实现上需要进行连续变量和离散变量的联合优化, 直接处理的复杂度较大。本文采用以下状态组合模型, 将该问题转换成纯连续变量优化。

4.2 状态组合模型

鉴于各载波带宽相同这一前提, 在每一 MF-TDMA 时隙, 本文只考虑在 K 个地球站中选择 N 个的问题, 不考虑选中的 N 个地球站的载波分配问题, 故时频资源具体化为时隙资源。定义每一个选择方案为多址接入的一个状态, 故该系统有 $S = \binom{K}{N}$ 个状态, 状态集合为

$$\mathfrak{S} = \{(\delta_{s,1}, \delta_{s,2}, \dots, \delta_{s,K}) \mid \delta_{s,k} \in \{0,1\}, \sum_{k=1}^K \delta_{s,k} = N, s=1,2,\dots,S\}$$

另外定义第 s 状态的出现时间比为 π_s , $\pi_s \leq 1$, 可知 $\sum_{s=1}^S \pi_s \leq 1$ 。定义 $p_{s,k}$ 为状态 s 下对第 k 个地球站分配的卫星发射功率, 若该值为零则表示状态 s 中的载波不服务第 k 个地球站。可以看出, 上一节所述的 BPP 问题的所有解均可以等效成多个状态的组合, 故称状态组合模型, 该状态组合模型可以表示为参数集 $\langle p_{s,k}, \pi_s, \forall s, k \rangle$, 如图 2 所示。

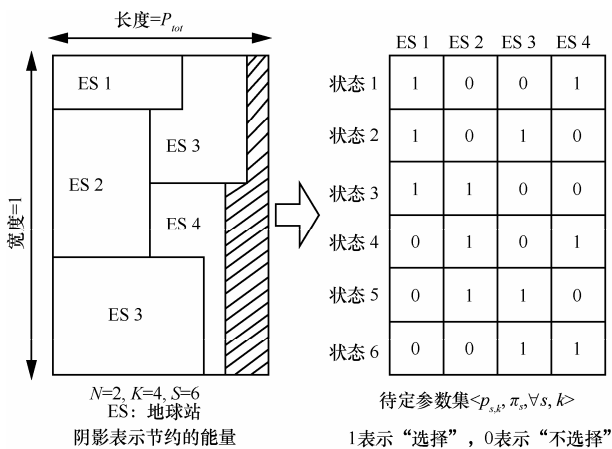


图 2 2D-BPP 变种问题及状态组合模型

4.3 能量节约问题

基于以上模型, 可以将能量节约问题建模 (P1) 如下。

$$\begin{aligned} \min_{P_{s,k}, \pi_s} \quad & E = \sum_{s=1}^S \sum_{k \in \Omega_s} \pi_s p_{s,k} \\ \text{满足} \quad & \sum_{s \in \omega_k} \pi_s \log(1 + p_{s,k} g_k) \geq C_k, \forall k \\ & \sum_{k \in \Omega_s} p_{s,k} \leq P_{tot}, \forall s \\ & \sum_{s=1}^S \pi_s \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, Ω_s 表示状态 s 中所有载波服务的地球站集合, ω_k 表示第 k 个地球站分配有服务载波的所有状态集合。目标函数是能量消耗最小化, 约束条件分别是满足容量需求、总功率受限和总时隙资源受限。

易知该问题为凸优化问题, 但在后文尝试采用经典凸优化理论求解后发现, 该问题存在参数耦合现象, 需要重新依此特性设计新算法。

5 功率和时频资源联合优化

鉴于功率节约和时间节约都能节约能量, 所以在对上述问题求解之前, 先引入以下定理。

定理 1 在满足需求容量的前提下, 总传输耗能与传输时间成反比, 与传输功率成正比。

证明 限于篇幅, 这里略。

5.1 最优性条件

易知(P1)为凸优化问题, 引入 0-1 变量 $\delta_{s,k}$ 后, 得到其拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} J_1(\{p_{s,k}\}, \{\pi_s\}, \lambda, \beta, \gamma) &= \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \pi_s p_{s,k} \delta_{s,k} - \\ & \sum_{k=1}^K \lambda_k \left[\sum_{s=1}^S \pi_s \log(1 + p_{s,k} g_k) \delta_{s,k} - C_k \right] + \\ & \sum_{s=1}^S \beta_s \left[\sum_{k=1}^K p_{s,k} \delta_{s,k} - P_{tot} \right] + \gamma \left[\sum_{s=1}^S \pi_s - 1 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_K) \geq 0$, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_S) \geq 0$ 和 γ 为拉格朗日因子。应用 KKT 条件, 可以得到最优分配 $p_{s,k}^*$ 和 π_s^* 的充要条件如下。

$$\frac{\partial J_1(\dots)}{\partial p_{s,k}^*} \begin{cases} = 0, & p_{s,k}^* > 0 \\ > 0, & p_{s,k}^* = 0 \end{cases}, \forall s, k \quad (7)$$

$$\frac{\partial J_1(\dots)}{\partial \pi_s^*} \begin{cases} > 0, & \pi_s^* = 0 \\ = 0, & 0 < \pi_s^* < 1, \forall s \\ < 0, & \pi_s^* = 1 \end{cases} \quad (8)$$

分别对 $p_{s,k}$ 和 π_s 求偏导，得到

$$\frac{\partial J_1}{\partial p_{s,k}} = \pi_s \delta_{s,k} - \lambda_k \pi_s \delta_{s,k} \frac{g_k \log e}{1 + p_{s,k} g_k} + \beta_s \delta_{s,k} \quad (9)$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial \pi_s} = \sum_{k=1}^K p_{s,k} \delta_{s,k} - \sum_{k=1}^K \lambda_k \log(1 + p_{s,k} g_k) \delta_{s,k} + \gamma \quad (10)$$

令 $\frac{\partial J_1}{\partial p_{s,k}} = 0$ ，并联合 KKT 条件式 (7)，可以得到

$$p_{s,k}^* = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_k \pi_s \log e}{\pi_s + \beta_s} - \frac{1}{g_k} \right)^+, & \delta_{s,k} = 1 \\ 0, & \delta_{s,k} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

这里 $(x)^+ = \max(0, x)$ 。从注水算法^[17]角度可以看出，同一系统状态下不同的地球站的功率注水水平取决于 λ_k ；同一地球站在不同系统状态下的功率注水水平取决于 π_s 和 β_s 。从而得出该 2 类变量是耦合的，无法通过传统的注水算法求解，本文提出迭代对偶优化算法 (IDO, iterative dual optimization) 求解该问题。

5.2 给定时间比的功率分配

定义 \mathbf{x} 为所有功率分配矩阵 $\mathbf{p} = [p_{s,k}]$ 的集合，在给定时间比 π_s 的前提下，问题 (P1) 的对偶优化函数为

$$\begin{aligned} \xi(\lambda, \beta) &= \min_{\mathbf{p} \in \mathbf{N}} J_2(\{p_{s,k}\}, \lambda, \beta) \\ &= \min_{\mathbf{p} \in \mathbf{N}} \left\{ \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \pi_s p_{s,k} \delta_{s,k} - \sum_{k=1}^K \lambda_k \left[\sum_{s=1}^S \pi_s \log(1 + p_{s,k} g_k) \delta_{s,k} - C_k \right] + \sum_{s=1}^S \beta_s \left[\sum_{k=1}^K p_{s,k} \delta_{s,k} - P_{tot} \right] \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

对偶优化问题为

$$\begin{aligned} \max \quad & \xi(\lambda, \beta) \\ \text{满足} \quad & \lambda \geq 0, \beta \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

为求解该问题，首先将其分解为 S 个独立的对偶优化问题。

$$\xi(\lambda, \beta) = \sum_{s=1}^S \xi_s(\lambda, \beta) + \sum_{k=1}^K \lambda_k C_k - P_{tot} \sum_{s=1}^S \beta_s \quad (14)$$

这里的

$$\begin{aligned} \xi_s(\lambda, \beta) &= \min_{\mathbf{p} \in \mathbf{N}} \left\{ \pi_s \sum_{k \in \Omega_s} p_{s,k} - \pi_s \sum_{k \in \Omega_s} \lambda_k \log(1 + p_{s,k} g_k) + \beta_s \sum_{k \in \Omega_s} p_{s,k} \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

将最优性条件式(11)代入式(15)，可得简化式如下。

$$\begin{aligned} \xi_s(\lambda, \beta) &= (\pi_s + \beta_s) \sum_{k \in \Omega_s} p_{s,k}^*(\lambda, \beta) - \pi_s \sum_{k \in \Omega_s} \lambda_k \log(1 + p_{s,k}^*(\lambda, \beta) g_k) \quad (16) \end{aligned}$$

这里 $p_{s,k}^*(\lambda, \beta) = \left(\frac{\lambda_k \pi_s \log e}{\pi_s + \beta_s} - \frac{1}{g_k} \right)^+ \delta_{s,k}$ 为功率分配值关于对偶变量的函数。对偶函数的子梯度可以写成

$$\nabla \lambda_k = - \sum_{s=1}^S \pi_s \log(1 + p_{s,k}^*(\lambda, \beta) g_k) \delta_{s,k} + C_k \quad (17)$$

$$\nabla \beta_s = \sum_{k=1}^K p_{s,k}^*(\lambda, \beta) \delta_{s,k} - P_{tot} \quad (18)$$

定义 $\nabla = (\nabla \lambda_k, \nabla \beta_s)$ ，对偶变量的更新方程为

$$(\lambda_k, \beta_s)^{(l+1)} = (\lambda_k, \beta_s)^{(l)} + \epsilon^{(l)} \nabla \quad (19)$$

其中，上标 l 表示第 l 步迭代， $\epsilon^{(l)}$ 表示第 l 步迭代的步长。关于迭代初始值的选取，这里不加证明（方法见文献[17]）地直接给出。

$$\begin{cases} \frac{\ln 2}{g_k} \leq \lambda_k^* \leq \ln 2 \left(\frac{P_{tot}}{g_k} + \frac{1}{g_k} \right) \\ 0 \leq \beta_s^* < \pi_s P_{tot} \max_{k \in \Omega_s} (g_k) \end{cases} \quad (20)$$

5.3 时间比的更新

根据上节分析，在不同的时间比下可得到不同的最优功率分配方案；但是由于式 (10) 缺少 π_s 项，无法直接获得最佳时间比。注意到功率分配值确定后式 (10) 为常数，故本节提出一种时间比更新的算法。

根据梯度定义，这里将梯度方向的反方向作为时间比的更新方向，如式 (21) 所示。

$$\pi^{(l+1)} = \pi^{(l)} - \epsilon^{(l)} \nabla \pi \quad (21)$$

这里， $\epsilon^{(l)}$ 为时间比第 l 步更新的步长，梯度值 $\nabla \pi = \left(\frac{\partial J_1}{\partial \pi_1}, \dots, \frac{\partial J_1}{\partial \pi_S} \right)$ 可以通过将 $p_{s,k}^*$ 和 λ_k^* 代入式

(10) 得到。考虑到定理 1，可知最优时间比之和

应该尽可能大，也即需满足 $\sum_{s=1}^S \pi_s = 1$ 。这样时间比的更新应满足

$$\sum_{s=1}^S \pi_s^{(l+1)} = \sum_{s=1}^S \pi_s^{(l)} - \varepsilon^{(l)} \sum_{s=1}^S \nabla \pi_s = 1 \quad (22)$$

可解得

$$\sum_{s=1}^S \nabla \pi_s = \sum_{s=1}^S V_s + S\gamma = 0 \quad (23)$$

其中， $V_s = \sum_{k \in \Omega_s} p_{s,k} - \sum_{k \in \Omega_s} \lambda_k \log(1 + p_{s,k} g_k)$ 。从而可以得出 γ 值，这里记为 $\gamma = \gamma^{(l)}$ 。将该值代入到式(21)，可实现对时间比的更新。更新终止条件设定为

$$\Delta E < \diamond \quad (24)$$

这里， ΔE 为参数更新后得到的能耗差值， \diamond 为非常小正常值。

最后，该迭代对偶优化算法的执行过程如图 3 所示。

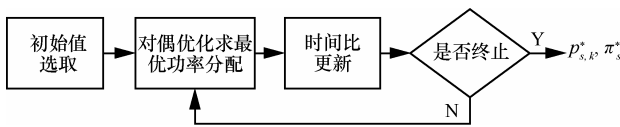


图 3 迭代对偶优化算法的执行过程

6 仿真结果及性能分析

首先对算法复杂度进行分析。本文所提算法为凸优化解法，算法复杂度取决于变量个数^[18]，即 $O(KS)$ 。另外求解该功率和时频资源联合优化问题，还可采用强搜索算法。若将单位超帧在时间上划分为 L 时隙 ($L > S$ 以保证最优解在搜索范围内)，则各时隙的载波分配有 $\binom{K}{N}$ 种可能，故强搜索算法

的算法复杂度为 $O(S^L)$ ，远远差于本算法。相比其他非联合优化算法，固然在复杂度上存在缺陷，但是在能量利用效率上的优势将是本文研究的初衷。

仿真场景：GEO 卫星单波束覆盖下，地球站数目固定为 $K = 8$ 。所有地球站通过 MF-TDMA 进行上下行通信（收跳发不跳），其各自 CNR 值在 $-20 \text{ dB} < g < 0 \text{ dB}$ 范围内以均匀分布随机生成。卫星上总可用功率为 $P_{tot} = 100 \text{ W}$ 。迭代对偶优化的初始参数选取依据式 (20) 随机产生，终止条件为 $\diamond = 10^{-5}$ 。

本文与资源独立优化算法进行比较。对比对象 1 为功率固定分配，固定多载波的发射功率，只优化时隙分配，现有的 MF-TDMA 中时隙分配技术均属此范畴。这里采用均等发射功率，则为节约能量，用作对比的时隙分配算法在理论上为各地球站分配最优的时隙长度为

$$\tau_k = \frac{C_k}{\log(1 + P_{tot} g_k / N)}, k = 1, 2, \dots, K \quad (25)$$

进而能耗可以通过 $E = \sum_{k=1}^K p_k \tau_k$ 获得。对比对象 2 为时间固定分配，固定各地球站的分配时隙，通过调整多载波的发射功率提高能效，现有的固定时隙分配均属此范畴。以节约能量为目标，本文采用等分的时隙时间，并理想化计算各地球站功率分配值

$$p_k = \frac{2^{C_k K / N} - 1}{g_k}, k = 1, 2, \dots, K \quad (26)$$

进而能耗可以通过 $E = \sum_{k=1}^K p_k \tau_k$ 获得。另外，若存在载波数目大于等于地球站数目的理想情况，则各地球站无可用时隙约束，可视为资源联合分配的上界情况，在仿真中也一并给出。

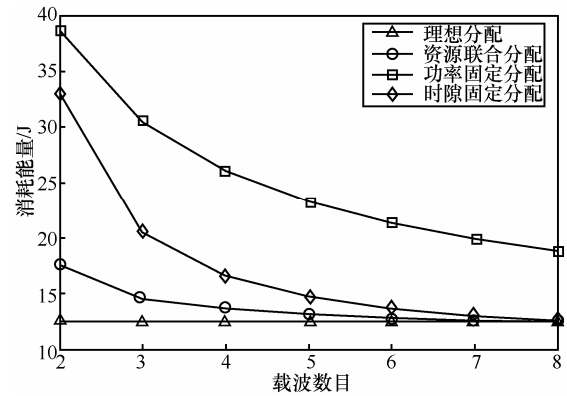


图 4 消耗能量与载波数目关系

图 4 所示为不同载波数目对能量节约的影响，各用户的容量需求 C_k 在系统可承载范围内随机生成（见式(27)），并在仿真过程中保持不变。

$$C \in \left\{ C \left| \sum_{k=1}^K \frac{C_k}{\log(1 + P_{tot} g_k)} < 1 \right. \right\} \quad (27)$$

从图 4 可以看出，理想节能策略只需消耗 12.5 J 能量就可以满足系统容量需求，而固定功率的最优节能策略却最高需要 40 J 能量，能耗多于 3 倍，可

见能量节约确有必要。各算法消耗能量均随载波数目的增加而耗能减少，主要原因是载波也是一种资源，使用较多载波也可以减少能量的消耗。本文所提资源联合分配算法优于 2 种非联合算法，尤其是在载波数目较少时优势更加明显。在载波数目等于地球站数目时，MF-TDMA 等价于 FDMA 多址接入，只需优化各自载波上的功率分配，这样资源联合分配转变成固定时间分配，故两者重合；又因为这种功率配置取决于容量需求和信道条件，故可能不尽相同，在节能效果上优于固定功率分配。需要说明的是，本文仅在理论上研究节能和载波数目的关系，在工程上需考虑更多的因素。

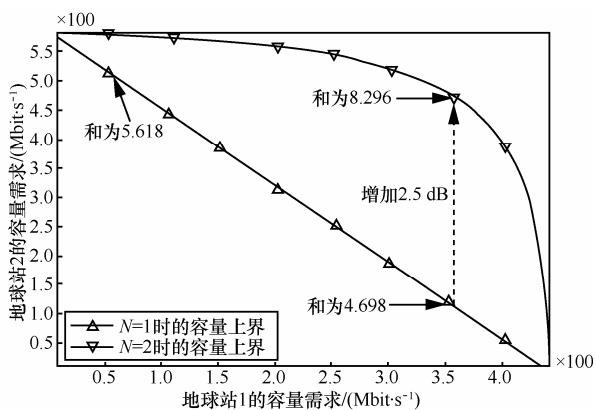


图 5 系统容量上界

图 5 所示为给定能量下的能效（流量与能量的比值）。为简单起见，选取 $K=2$ 个地球站，各自的 CNR 值分别为 $g_1 = -7 \text{ dB}$ ， $g_2 = -2.6 \text{ dB}$ 。设定最大可用功率 $P_{tot} = 100 \text{ W}$ ，在载波数目为 $N=1$ 和 $N=2$ 时分别给出系统容量的上界，即最大可承载流量。系统容量可由 2 个用户的流量相加得到。可以看出在单载波和双载波情况下系统的能效都随地球站的流量不同而不同。特别地， $N=1$ 时容量界为一直线，当地球站 1 的容量需求较小时，系统能效（比如图 5 中左上标注点的系统容量为 5.618）比容量需求较大时（比如图 5 中右下标注点的系统容量为 4.698）的系统能效高，主要是由于地球站 2 有较优的信道条件（ $g_2 = -2.6 \text{ dB}$ ），可以获得更多的能量，也即分配给信道条件较好的地球站可以获得更大的系统能效。该结论容易理解。另外，给定地球站 1 的容量需求，载波数目由 1 增大至 2 后，地球站 2 的可支持容量由 4.698 增大至 8.296（超过 2.5 dB），可知载波数的增加同样可以提高系统能效，且提高幅度较大，该结论与图 4 结论一致。

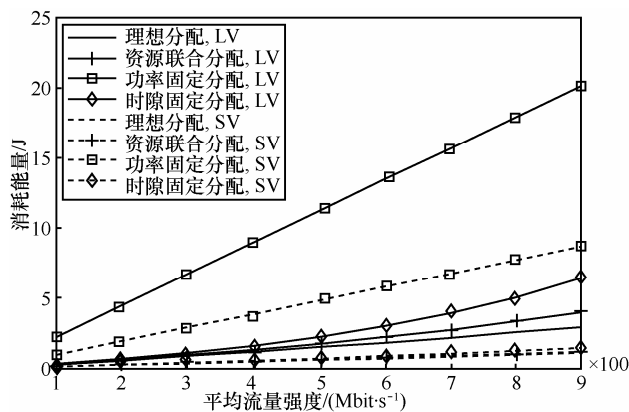


图 6 消耗能量与平均流量关系

图 6 所示为不同流量模式下的能耗情况。仿真中令各地球站的容量需求服从高斯分布，期望为平均流量强度，方差定义为流量方差。信道 CNR 值均匀分布在 $-20 \text{ dB} < g < 0 \text{ dB}$ 内。可以看出，随着流量强度增加，系统所需能耗增加。本文所提资源联合优化算法在节能方面优于其余 2 种非联合优化算法，且随着流量的增加这种优势将更加明显，这主要是由于联合优化算法可以更高效地利用功率和时频资源。设置不同的流量方差场景，SV 表示较小方差，即各地球站流量相当；LV 表示较大方差，即各地球站流量差别较大。对比可知大方差下所需能耗大于小方差所需能耗，且资源联合优化算法性能在大方差场景下具有更明显的优势，主要是由于流量差异越大，资源配置的必要性越高，尤其是资源联合配置的有效性能较好体现。

7 结束语

本文考虑卫星中资源联合优化问题，联合设计了 MF-TDMA 体制中的功率分配和时隙资源分配。以能量节约为牵引，建立了资源联合优化的模型。在问题求解过程中，提出了迭代对偶优化算法，获得了最优的资源联合分配方案。从仿真分析可以看出，资源联合优化明显优于非联合优化算法。

参考文献：

[1] 甘仲民, 张更新. 卫星通信技术的新发展[J]. 通信学报, 2006, (8):2-9.
GAN Z M, ZHANG G X. Current development of satellite communication technology[J]. Journal on Communications, 2006, (8):2-9.
[2] 郝学坤, 孙晨华, 李文铎. MF-TDMA 卫星通信系统技术体制研究[J]. 无线电通信技术, 2006, 32(5):1-3.
HAO X K, SUN C H, LI W D. The investigation of MF-TDMA satellite communication system[J]. Radio Communications Technology, 2006,

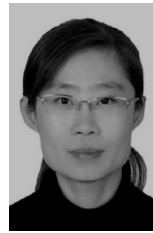
- 32(5):1-3.
- [3] JUNG M P, SAVAGAONKAR U, CHONG E K P, *et al.* Allocation of QoS connections in MF-TDMA satellite systems: a two-phase approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(1):177-190.
- [4] SARA A, EITAN A, JEROME G, *et al.* Quasi-optimal resource allocation in multi-spot MF-TDMA satellite networks[J]. *Combinatorial Optimization in Communication Networks*, 2006, 12: 325-366.
- [5] KI D L, HO J L, YONG H C, *et al.* Throughput-maximizing timeslot scheduling for interactive satellite multiclass services[J]. *IEEE Communications Letters*, 2003, 7(6): 263-265.
- [6] MORELL A, SECO G G, VAZQUEZ C M A. Cross-layer design of dynamic bandwidth allocation in DVB-RCS[J]. *IEEE Systems Journal*, 2008, 2(1):62-73.
- [7] WILDE A, SCHNELL M. Adaptive resource sharing for satellite TDMA, satellite communications[A]. 3rd European Conference on ECSC-3[C]. 1993.306-308.
- [8] 曾显华, 陈建州, 刘立祥. GEO 移动通信系统中 MF-TDMA 突发分配算法研究[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(12):3708-3711.
ZENG X H, CHEN J Z, LIU L X. MF-TDMA burst allocation algorithm in GEO telecommunication system[J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(12): 3708-3711.
- [9] GIAMBENE G, MIANO F, ZOLI E. Energy-efficient packet access scheme for MF-TDMA in non-GEO satellite systems[A]. *IEEE 59th Vehicular Technology Conference*[C]. 2004.2792-2796.
- [10] MONK A M, MILSTEIN L B. Open-loop power control error in a land mobile satellite system[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1995, 13(2):205-212.
- [11] VASSAKI S, PANAGOPOULOS A D, CONSTANTINOU P. Effective capacity and optimal power allocation for mobile satellite systems and services[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(1): 60-63.
- [12] DESTOUNIS A, PANAGOPOULOS A D. Dynamic power allocation for broadband multi-beam satellite communication networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(4):380-382.
- [13] SRIVASTAVA N K, CHATURVEDI A K. Flexible and dynamic power allocation in broadband multi-beam satellites[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(9):1722-1725.
- [14] HONG Y, SRINIVASAN A B, CHENG L H, ANDREADIS P. Optimal power allocation for multiple beam satellite systems[A]. *Proceedings of the IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS 08)*[C]. 2008. 823-826.
- [15] CHOI J P, CHAN V W S. Optimum power and beam allocation based on traffic demands and channel conditions over satellite downlinks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(6): 2983-2993.
- [16] TAO M, LIANG Y C, ZHANG F. Resource allocation for delay differentiated traffic in multiuser OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(6): 2190-2201.
- [17] STEPHEN D. VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge University Press, 2004.

- [18] XIONG C, LI G Y, ZHANG S. Energy-efficient resource allocation in OFDMA networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(12): 3767-3778.

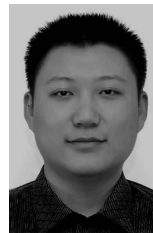
作者简介:



韩寒 (1986-), 男, 山东枣庄人, 解放军理工大学博士生, 主要研究方向为认知无线电、卫星通信、资源调度、任务调度。



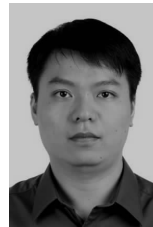
李颖 (1978-), 女, 山东烟台人, 博士, 中国电子设备系统工程公司工程师, 主要研究方向为通信信号处理、认知无线网络。



董旭 (1979-), 男, 河北景县人, 博士, 解放军西安通信学院讲师, 主要研究方向为认知无线网络、无线资源管理、通信系统架构等。



国晓博 (1985-), 男, 河北石家庄人, 博士, 中国电子科技集团第 54 研究所工程师, 主要研究方向为卫星通信。



黄勤飞 (1984-), 男, 江西上饶人, 北京首都公路发展集团高级工程师, 主要研究方向为通信信号处理与智能交通技术。