定向天线卫星网络空间重用的带宽预留算法*

李 媛[1†], 孙宝林[1], 罗 星[2,3]

(1. 湖北经济学院 信息管理学院, 武汉 430205; 2. 华中科技大学 机械学院, 武汉 430077; 3. 中国船舶重工集团公司第 722 研究所, 武汉 430079)

摘 要: 基于无线网络中设计提供服务质量(quality of service, QoS)的路由协议是一项具有挑战性的工作,提出无线卫星网络中基于定向天线的服务质量保证的空间重用的带宽预留算法。卫星网络中许多音/视频会议、远程教育等重要应用,需要服务质量保证。无线网络中的定向天线技术提供了显著增加空间重用性的能力,提高无线网络中的数据传输效率。研究使用定向天线的无线卫星网络中基于时分多址的带宽预留算法,该算法给不同方向的地面终端分配相同时隙来提高带宽资源的空间重用性,提高通信效率。通过模拟实验分析研究证明,该算法在服务质量调用成功率、吞吐量和延迟方面有比较好的性能。

关键词: 带宽预留; 定向天线; 时分多址; 卫星网络; 空间重用

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)08-3103-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.079

Spatial reused bandwidth reservation in satellite networks using directional antennas

LI Yuan[1†], SUN Bao-lin[1], LUO Xing[2,3]

(1. *Dept. of Information, Hubei University of Economics, Wuhan* 430205, *China*; 2. *School of Mechanical, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan* 430077, *China*; 3. *No.* 722 *Research & Development Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Wuhan* 430079, *China*)

Abstract: The design of a routing protocol for the provision of QoS in a satellite network is a challenging task. This paper proposed a novel spatial reused bandwidth reservation for QoS guaranteed in satellite networks based on directional antennas. Many important applications, such as audio/video conferences and distance education, require the quality of service guarantee in satellite networks. Directional antennas technology in wireless network provided the capability for considerable increase in spatial reuse, which increased the efficiency of communication. It studied a time division multiple access (TDMA)-based bandwidth reservation scheme by using directional antennas in satellite networks. This scheme allocated and reserved different time slots to different directional ground terminals, which could improve the spatial reuse of bandwidth resource and the efficiency of communication. This paper carried out simulations to study the performance of this scheme. The proposed scheme performs better in terms of QoS call success rate, throughput and delay.

Key words: bandwidth reservation; directional antennas; TDMA; satellite networks; spatial reused

未来网络将支持各种类型的通信,如实时、交互式和非实时等通信,不同的通信类型需要为多媒体服务提供不同等级的服务质量。近年来,作为地面网络补充的卫星网络已经明显引起了研究人员的注意。在卫星网络中提供服务质量保证的路由协议的设计是一项具有挑战性的工作。与无线网络一样,卫星信道的带宽和能量的限制对在卫星网络中提供服务质量的支持提出了挑战。因此必须高效地利用无线信道来提高服务质量支持。尽管有许多挑战,研究人员已提出了许多无线网络中提供服务质量的方法[1~6]。

随着服务质量要求的连接越来越多,静态的带宽预留方法不能满足应用所需的服务质量要求,因此动态的带宽预留方法变得越来越重要。这种方法能够根据各种各样的参数(如带宽、延迟、丢包率等)动态地分配无线信道资源。与静态带宽预留方法相比较,动态带宽预留方法能够高效地利用卫星信道资源,提高服务质量水平。Manvi 等人[7]基于缓冲、拥塞水平、队列长度、反馈信息等详细描述了静态和动态带宽分配方法。文献[8]提出基于模糊的动态带宽分配方法,将带宽作为一个模糊参数但分配的带宽略小于应用所需带宽。Zhai 等人[9]提出了一种基于队列长度的公平排队算法。根据最大最小公平算法[10],文献[11]提出一种基于服务质量的动态带宽分配方法。

在无线网络中,节点一般使用全方向天线传输数据分组,全方向天线将能量平均地分布在所有方向上。大多数无线网络服务质量保证的研究工作关注于节点使用全方向天线。定向天线允许发送节点在特定的方向上传输数据分组,同时相邻的接收节点在特定的方向上接收数据分组[12]。定向天线技术具有下列优点:a)节点在特定方向上传输和接收数据分组,所以使用的能量比较少;b)其他方向的节点可以使用相邻区域来传输数据分组,因此提高了空间重用性;c)路径有比较少的跳数和端到端延迟,因此提高了服务质量[12]。本文在基于服务质量的动态带宽分配方法的基础上,提出一种定向天线卫星网络的空间重用的带宽预留算法。

收稿日期: 2011-12-11; **修回日期:** 2012-01-13 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60602029, 60772088); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队资助计划项目(T200902); 湖北省教育厅科研项目(Q20112205)

作者简介: 李媛(1978-),女(通信作者),湖北武汉人,博士,主要研究方向为无线网络、分布对象计算(liyuanlx@126.com);孙宝林(1963-),男,教授,博士(后),主要研究方向为无线网络、服务质量路由;罗星(1979-),男,工程师,硕士,主要研究方向为天线系统.

1 相关工作

本文采用文献[13]所提出的 DVB-RCS 网络体系结构模型。在 DVB-RCS 网络中,数据流通过时分多址(TDMA)上行链路传输到卫星;用户信号在卫星上通过解调、再生和多路复用并转发给下行链路。所有的地面终端(ground terminal, GT)能够传输和接收数据流,因此 DVB-RCS 网络允许所有的终端能够彼此交换数据信息。DVB-RCS 网络体系结构如图 1 所示。

一般来说,DVB-RCS 网络体系结构有一个网络控制中心(network control center, NCC),负责控制和监督所有地面终端的数据传输和接收,采用特定的方法分配容量给终端节点。这种分层结构是由超帧和帧组成的,为 GT 建立用于数据传输和数据接收的时隙(time slot)分配。NCC 周期性广播突发时间安排消息给所有的地面终端。为了满足各类实时和多媒体应用的服务质量要求, GT 将周期性提交给 NCC 一个带宽请求消息,然后 NCC 根据请求消息通过带宽分配方法来确定时隙分配方案。提交请求与分配带宽之间的时间称为分配延迟,影响着卫星网络性能和稳定性。

在文献[13]中,采用通信速率作为服务质量的参数。

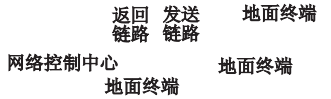
$$R(t) = r(t) + r_{\min} + \frac{q(t)}{T} \tag{1}$$

其中:$r(t)$表示在时间 t 内进入到 GT 的平均通信速率;$q(t)$表示时间 t 内等待队列长度;$1/T$ 是一个比例因子;$r_{\min}$是保证队列长度稳定性的带宽。当被分配的带宽是 $R(t)$时, GT 能够满足应用要求,并在时间 T 内清空队列。

在 DVB-RCS 网络中还有其他带宽分配方法。在先进先出按序需求分配方法(FIFO ordered demand assignment, FODA)[14]中,NCC 按照带宽请求到达的先后次序给每个请求带宽的 GT 分配带宽,这一过程直到所有请求得到满足或所有时隙分配完后才结束。当某些 GT 有比较少流量时,这种方法将分配给其他 GT 更多流量。如果流量负载变动明显,GT 将不处理分配的资源,这将导致更多的应用拒绝率和更多的连接延迟和抖动。在未来网络中有更多的脉冲通信、交互式通信和实时通信,具有低负载、高波动和延迟敏感的特性,因此 FODA 不适合用于未来多媒体网络应用的带宽分配。在按比例分配方法(proportional scheme, PS)[14]中,NCC 计算所有 GT 的总带宽请求。如果总带宽超过一个帧中可获得的时隙数,则按照每个请求中占总带宽请求的比例给每个 GT 分配时隙;否则按照请求的带宽分配时隙。这种方法有比较少的延迟,但不适合于低负载的交互式通信。

Bertsdkas 等人[10]提出了最大最小公平算法(max-min fair scheme),NCC 根据带宽需要分配资源。没有源节点能够得到超过它所请求的资源,不满足要求的源节点将平等地分享带宽资源。根据这种算法,文献[11]提出最大最小动态带宽分配方法,首先计算所有请求的平均带宽(即 $a_R = B_R/n$)。如果请求的带宽低于平均带宽,则分配给 GT 所请求的带宽;如果请求的带宽高于平均带宽,则分配给 GT 平均带宽。如果带宽没有全部分配或请求没有全部满足,接着计算未满足要求的 GT 的平均带宽(即 $u_R = B_S/j$);如果所有请求都满足但还有剩余带宽,则将剩余带宽资源分配给所有 GT。

在上述带宽分配方法中,节点使用全方向天线传输和接收数据分组。通过使用全方向天线,数据分组被广播到所有方向的邻居节点。Jawhar 等人[15,16]研究了无线网络资源调度问题。图 2 显示全方向天线节点的传输模式,发送节点 S 在所有方向上传输数据包。图 3 显示定向天线节点的传输模式,(a)显示发送节点 S 带有四个方向的光束,可以在这四个方向上传输数据分组;(b)显示接收节点 R 带有四个方向的光束,可以在这四个方向上接收数据分组;(c)显示节点 A 与 B 之间的数据传输,节点 B 在 A 的发送方向上,节点 A 在 B 的接收方向上。



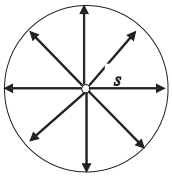
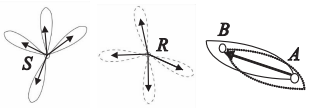


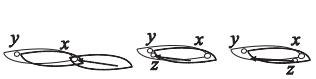
图1 DVB-RCS网络体系结构模型 图2 全方向天线节点传输模式

假设 x 与 y 是带有定向天线的邻居节点。如果 x 想传输数据分组给 y,x 必须将传输光束指向 y,且 y 必须将接收光束指向 x。如果下列三个条件都满足,则认为时隙 t 是空闲的,且可以预留 t 给 x 用于传输数据分组给 y:a)x 在 t 内没有接收数据,且 y 没有在 t 内发送数据;b)x 的邻居 z 与 y 在同一方向上,且没有在 t 内接收数据;c)y 的邻居 z 与 x 在同一方向上,且没有在 t 内发送数据[15,16]。

图 4 显示定向天线节点传输数据的例子,(a)中节点 x 在时隙 t 中接收数据,所以 x 不能传输数据给邻居 y;(b)中 x 的邻居 z 在时隙 t 中接收数据,且 z 和 y 在 x 的同一方向上,所以 x 不能传输数据给邻居 y;(c)中节点 y 的邻居 z 在时隙 t 中发送数据,且 z 和 x 在 y 的同一方向上,所以 y 不能接收来自邻居 x 传输的数据。



(a)传输模式 (b)接收模式 (c)通信模式



(a) (b) (c)

图3 带有定向天线节点的传输模式 图4 定向天线节点传输数据

在定向天线的研究中,Bazan 等人[17]提出定向天线无线 Mesh 网络的路由协议和接入控制方法,接入控制直接关系着信道的利用效率和网络性能[22];Chen 等人[18]提出定向天线无线自组网的服务质量路由协议;Chin 等人[19]提出的无线 Mesh 网络空间 TDMA 调度算法用于数据传输和接收;单志龙等人[20]研究定向天线无线自组网的 MAC 协议。但定向天线技术很少用于无线卫星网络中,本文将定向天线用于卫星网络中。

2 卫星网络空间重用的带宽预留算法

根据最大最小公平算法[10]和最大最小动态带宽分配方法[11],提出定向天线卫星网络基于服务质量的空间重用的带宽预留算法。本文采用多波束适应数组(multibeam adaptive array, MBAA)[17],能够形成多条光束用于不同方向上的同时传输数据或接收数据。假设在卫星网络中,每个节点(地面终端)带有四个光束的 MBAA 天线组数,网络中其中一个 GT 作为 NCC 且负责带宽分配。

首先每个 GT 周期性地提交给 NCC 一个 QoS 请求包,其中包括带宽要求 b。在时分多址无线网络中,带宽要求用时隙的数目来衡量[1,3]。只有在 NCC 分配并预留带宽给所有 GT 后,才开始进行数据传输。NCC 首先计算所有 GT 的总带宽请求,然后根据式(2)计算平均带宽请求 B_{ave}。其中 b_i 表示第 i 个到达 NCC 的请求的带宽要求,n 表示发出请求的 GT 的数目。如果所有 GT 都在 NCC 的同一方向上,NCC 将分配

平均带宽 B_{ave} 给所有请求的 GT。这种情况相当于使用了全方向天线。

$$B_{ave}=\frac{\sum_{i=0}^{n-1} b_i}{n} \tag{2}$$

为避免隐藏终端的干扰,NCC 给相同方向上的 GT 分配完全不同的时隙来传递数据分组。如果 GT 请求的带宽少于 B_{ave},则分配请求的带宽;否则分配平均带宽 B_{ave}。如果还有带宽没有分配,还有请求没有满足,将根据式(3)分配剩余带宽的平均值给所有没有满足带宽要求的 GT。其中:B_f 是上次分配后剩余的空闲带宽;j 是未满足带宽要求的 GT 的数目;B_u 是给未满足带宽要求的 GT 分配的带宽。

$$B_u=\frac{B_f}{j} \tag{3}$$

$$B_u=\frac{B_f}{n} \tag{4}$$

如果所有请求已经满足但还有剩余带宽,根据式(4)将剩余带宽平均分配给所有 GT。这一过程直至所有带宽被分配完才结束。上述过程的伪代码如下所示:

```
set B_ave = Σ_{i=0}^{n-1} b_i/n and i = 0;
for( i = 0; i < n; i + + )
{ if ( r_i < B_ave then allocate r_i to GT_i , and s = r_i ;
  else allocate B_ave to GT_i , set s = B_ave and j + + ;
  r_i = r_i − s;
}
if( not all the bandwidth be allocated)
{ if( not all the requests are meeted)
{ set B_u = B_f/j and allocate them to unsatisfied GTs;
} else
{ set B_u = B_f/n and allocate them to all GTs;
}
}
```

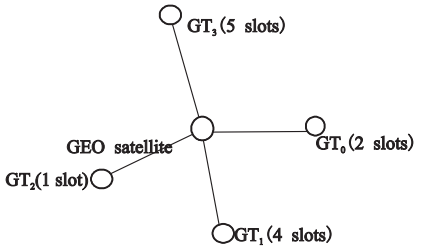


图5　带宽请求的例子

表 1　全方向天线的带宽分配情况

B_{ave}	GT_0	GT_1	GT_2	GT_3
(2+4+1+5)/4=3	{1,2}	{3,4,5}	{6}	{7,8,9}
(13−9)/2		{10}		{11,12}
(10−9)/2		{10}		不满足请求

图 5 显示卫星网络中 4 个 GT 带宽请求的情况,假设 4 个 GT 请求的带宽分别是 2、4、1、5 个时隙。平均带宽请求是 3 个时隙,GT_0 和 GT_2 能够预留分配给它们的满足带宽要求的时隙,GT_1 和 GT_3 分别预留 3 个时隙。在表 1 中,如果网络中可获得的带宽是 13 个时隙,给未满足要求的 GT 分配平均带宽 2 个时隙。在第一次带宽分配后 GT_1 再预留 1 个时隙,GT_3 再预留 2 个时隙,所以 4 个 GT 的调用成功率是 100%。如果网络中可获得的带宽是 10 个时隙,将剩余的 1 个时隙分配给 GT_1,而只分配了 3 个时隙的 GT_3 未能满足请求的带宽要求,所以 4 个 GT 的调用成功率是 75%。

在定向天线的卫星网络中,如果请求的 GT 都不在 NCC 同一方向上,则采用不同的带宽分配方法。对于不同方向上的 GT, NCC 分配相同的时隙用来传输数据,既避免隐藏终端的干扰,又提高空间重用性和传输效率。当采用 4 个光束的 MBAA 天线数组时,将所有请求的 GT 分为 4 个方向。NCC 对相同方向的 GT 分配不同的时隙用于传输数据,不同方向上的 GT 分配相同的时隙用于传输数据。NCC 将分配带宽的信息以 QoS 应答包的形式发送给各个请求带宽的 GT,收到 QoS 应答包的 GT 预留相应的时隙。空间重用的带宽预留算法的流程图如图 6 所示。其中:B_j 表示 NCC 在 j 点钟方向上的平均带宽请求;n_j 表示在 j 点钟方向上的 GT 数目,j 可以取的值分别是 3、6、9 和 12。

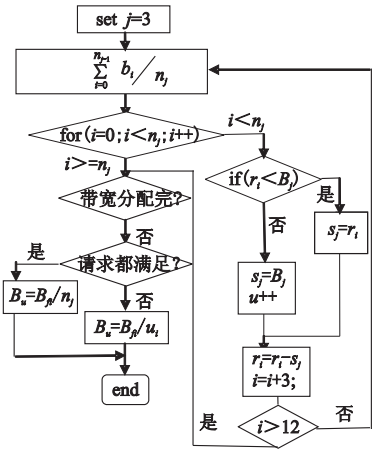


图6　空间重用带宽预留流程

图 6 显示卫星网络中使用定向天线的带宽预留过程,首先 NCC 计算 3 点钟方向的 n_3 个 GT 的平均带宽请求 B_3。如果请求的带宽小于 B_3 则分配 GT 所需的带宽;否则分配平均带宽 B_3。如果还有带宽没有分配或还有请求没有满足,NCC 计算未满足请求 GT 的剩余带宽平均。B_{f3} 是第一次分配后 3 点钟方向的剩余带宽,u_3 是未满足带宽请求的 GT 的数目。分配完 3 点钟方向的 GT 后,NCC 再分配 6 点方向的 GT。这一过程直到 9 点和 12 点方向的 GT 分配完带宽。

在图 5 中 4 个 GT 请求带宽分别是 2、4、1、5 个时隙。如果使用 4 个光束的定向天线,5 个相同的时隙能够分配给 4 个不同方向上的 GT。在表 2 中,如果可获得的带宽是 13 个时隙,首次分配后剩余的带宽是 8 个时隙;如果可获得的带宽是 10 个时隙,首次分配后剩余的带宽是 5 个时隙,剩余带宽可以分配给其他后来到达 NCC 的请求。

表 2　定向天线的空间重用带宽分配情况

剩余带宽	GT_0	GT_1	GT_2	GT_3
13−5=8	{1,2}	{1,2,3,4}	{5}	{1,2,3,4,5}
10−5=5	{1,2}	{1,2,3,4}	{5}	{1,2,3,4,5}

与全方向天线相比较,定向天线的带宽分配方法能够改善空间重用性,提高带宽资源的利用率。这种方法特别适用于负载比较重或带宽要求比较高的卫星网络环境中。因为相同的时隙可以分配给不同方向上的 GT,更多的剩余空闲带宽能够分配给更多的 GT,因此更多的带宽请求能够得到满足,提高了 QoS 调用成功率。表 2 显示空间重用的带宽预留算法在不同网络负载下调用成功率都是 100%,而表 1 显示全方向天线的带宽分配算法在较重网络负载下调用成功率是 75%。

3　模拟实验与分析

本章利用 NS-2[23] 仿真平台进行实验,从多个方面对空间重用的带宽预留算法的性能进行分析。仿真基于 TDMA 信道

模型。模拟场景如图 7 所示,模拟参数如表 3 所示。下行链路信道(downlink channel, DC)的数据传输率是 2 Mbps,上行链路信道(uplink channel, UC)的数据传输率是 512 kbps。卫星网络中一个 GT 作为 NCC,只有当 NCC 分配完带宽后数据传输才能开始。每个 GT 连接的最大的应用数目为 n;一个 hub 通过 GEO 卫星节点与 m 个 GT 连接。应用的到达时间遵循 Poisson 分布,平均中间到达时间是 $1/\lambda$。消息长度遵循指数分布,平均值是 $1/\mu$。一个帧长度是 40 μs,由 14 个时隙组成;一个时隙长度是 3 ms,一个时隙包含 184 Byte;模拟的持续时间是 200 s。GT 和 GEO 卫星节点可以通过 Otcl 代码来配置[13]。

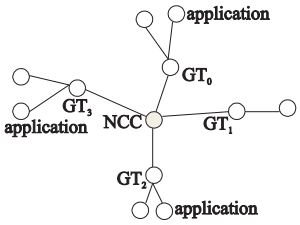


图7　模拟场景

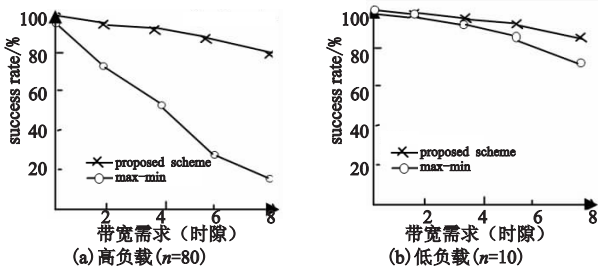
表 3　模拟参数

parameters	values	parameters	values
rate of DC	2 Mbps	frame length	40 ms
rate of UC	512 kbps	slot number	14
应用数目	n	slot length	3 ms
GT 数目	m	slot size	184 Byte
arrival T	$1/\lambda$	simulation time	200 s
message L	$1/\mu$		

本章将空间重用的带宽预留算法与最大最小带宽分配算法[11]进行比较。由于请求调用成功率对系统吞吐量和延迟造成很大影响,因此首先考虑调用成功率。此外,吞吐量、延迟也是衡量算法性能的重要指标。同时,为了体现算法对服务质量的支持,对抖动特性进行了分析。

1)调用成功率

调用成功率定义为成功预留带宽的 GT 与所有发出带宽请求的 GT 数目之比。调用成功率越高说明带宽资源分配更加合理和高效。图 8(a)显示在较高的网络负载下两种算法的调用成功率。假设每个 GT 连接了 80 个应用,即 n 的值为 80。从图中可以看出空间重用带宽预留算法有更高的调用成功率。因为使用定向天线的带宽预留算法可以分配相同的时隙给不同角度方向上的地面终端,所以更多的带宽请求能够得到满足。使用全方向天线的最大最小带宽分配算法给所有的地面终端分配不同的时隙,以避免隐藏终端干扰带来的冲突。这将导致网络负载较高的情况下,更多的请求由于缺乏空闲的带宽而无法分配,无法满足请求所需的带宽要求。



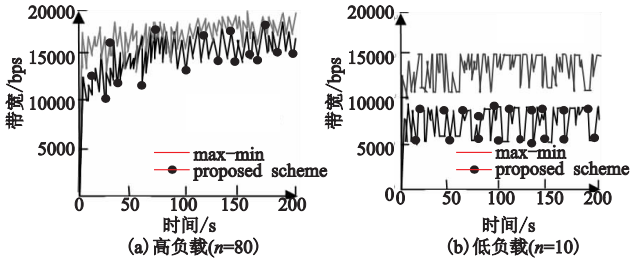
(a)高负载(n=80)　(b)低负载(n=10)

图8　不同网络负载下的调用成功率

图 8(b)显示在较低的网络负载下两种算法的调用成功率。假设每个 GT 连接了 10 个应用,即 n 的值为 10。从图中可以看出,两种算法在带宽要求较低的情况下调用成功率差别不大。在带宽要求较高的情况下,空间重用的带宽预留算法有更高的调用成功率。即使使用全方向天线的带宽分配方法,低带宽请求也容易得到满足,因此空间重用的带宽预留算法适合于负载较高的网络环境中。

2)吞吐量

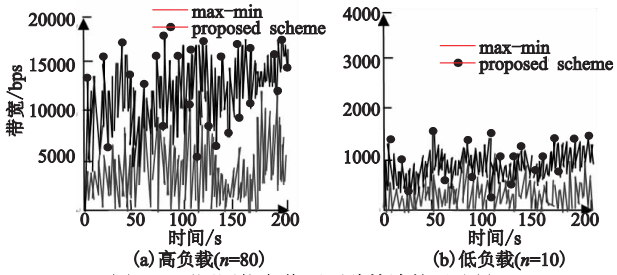
吞吐量是指在一定的时间间隔内传输数据包的字节数。在模拟实验中,本文分别比较两种算法终端的吞吐量和分配给终端的带宽。图 9(a)显示在网络负载较高的情况下分配给终端的带宽。假设有 80 个应用连接到每个终端,从图中可以看出,空间重用的带宽预留分配的带宽更少。图 9(b)显示在网络负载较低的情况下分配给终端的带宽。假设有 10 个应用连接到每个终端,全方向天线最大最小带宽分配方法在低负载网络中分配了更多带宽给终端。由于相同的时隙可以分配给不同角度方向上的终端,所以空间重用的带宽预留算法分配的带宽更少。



(a)高负载(n=80)　(b)低负载(n=10)

图9　不同网络负载下分配的带宽

图 10 显示两种算法在不同网络负载下终端的吞吐量。空间重用的带宽预留算法通过使用定向天线给更多的地面终端预留带宽,所以有更高的吞吐量。使用全方向天线的最大最小分配算法使用更多的空闲带宽,在负载较重情况下更多的带宽请求无法满足,所以吞吐量低于空间重用的带宽预留算法。



(a)高负载(n=80)　(b)低负载(n=10)

图10　不同网络负载下两种算法的吞吐量

3)延迟

延迟包含数据传输前的排队延迟和分组传输时间。对于 GEO 卫星网络来说,分组传输时间一般是固定的,所以衡量带宽分配方法主要是连接延迟和抖动。图 11 显示较高网络负载情况的连接延迟。假设有 80 个应用连接到每个终端,从图中可以看出,空间重用带宽预留算法的连接延迟低于全方向天线的带宽分配算法。

当网络负载很高时,最大最小带宽分配算法有较高的延迟。因为较高的网络负载导致终端队列中等待的分组的数目明显增加,使用当前网络带宽的终端不能清空等待队列。空间重用带宽预留算法通过预留更多的带宽满足更多的终端的带宽请求,所以有较低的连接延迟。

延迟抖动(delay jitter)是指分组通过网络连接到达目的地过程中分组延迟的变化程度,是考察网络服务质量的一个重要性能指标。在理想情况下,数据分组以同样的延迟穿过网络到达目的地。然而由于各种原因,包括网络拥塞、分组冲突等,各个分组所经历的延迟往往不尽相同[24],从而导致延迟抖动的差异。通常来说,延迟抖动越小,获得的流量越稳定[25]。

图 12 比较了两种算法的延迟抖动结果。当数据突然进入网络的情况下,最大最小带宽分配方法的延迟抖动明显厉害,而空间重用的带宽预留算法抖动较小。由于带宽预留方法消除了冲突,并且保障了成功节点的后续发送,在网络负载变动较大的情况下,可以获得较小的延迟抖动。所以空间重用的带宽预留算法更加稳定。

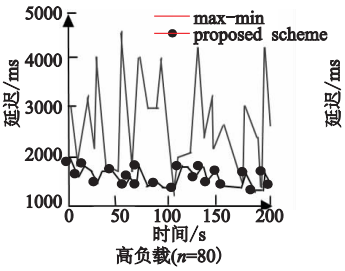


图11　两种算法的连接延迟

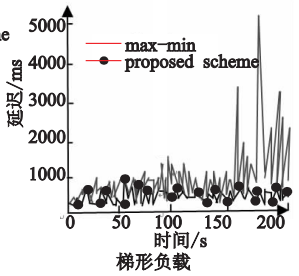


图12　两种算法的延迟抖动

4　结束语

传统的全方向天线带宽分配方法为避免隐藏终端带来的信号干扰,为所有的地面终端分配完全不同的时隙以满足应用所需的带宽要求。通常这种方法在网络负载较高的情况下,有较低的请求调用成功率和吞吐量,较高的连接延迟和抖动。

本文首次提出一种卫星网络空间重用的带宽预留算法,通过使用定向天线,为不同角度方向上的地面终端分配并预留相同时隙。定向天线能减少信号干扰,降低创建和维持通信的功率,提高卫星网络中带宽资源重用性和通信效率。模拟结果显示,空间重用的带宽预留算法在请求调用成功率、吞吐量、连接延迟及抖动等方面优于传统的最大最小带宽分配方法;在网络负载较高或带宽要求较高的情况下优势更加明显。未来笔者将通过额外的优化技术改进算法,进一步研究、分析和改进算法在不同网络环境和通信条件下的性能。

参考文献:

[1] LIN C R, LIU J S. QoS routing in Ad hoc wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1999, 17(1):1426-1438.

[2] CHEN L, HEINZELMAN W B. QoS-aware routing based on bandwidth estimation for mobile Ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(3):561-572.

[3] ZHU Chen-xi, CORSON M S. QoS routing for mobile Ad hoc networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Computer Communication. [S. l.]: IEEE, 2002:958-967.

[4] ABBAS A M, KURE O. A deadline-driven probabilistic quality of service routing for mobile Ad hoc networks[J]. International Journal of Digital Information Management, 2010, 8(2):136-142.

[5] LI Yuan, SUN Bao-lin, LUO Xing. Performance analysis of QoS multicast routing in mobile Ad hoc networks[J]. International Journal of Computer Network and Information Security, 2010, 2(1):26-32.

[6] WANG Neng-chung, LEE Chao-yang. A time slot assignment seheme for multi-path QoS multicast routing in mobile Ad hoc networks[C]//Proc of International Computer Symposium. 2010:529-534.

[7] MANVI S S, VENKATARAM P. A review of bandwidth allocation schemes in multimedia communications[C]//Proc of IETE Golden Jubilee Compendium. 2003:51-64.

[8] CHANDRAMATHI S, SHANMUGAVEL S. Fuzzy based dynamic bandwidth allocation for heterogeneous sources in ATM networks[J]. Applied Sofy Computing, 2003, 3(1):53-70.

[9] ZHAI Ming-yu, GU Guang-qun, YUAN Yuan. Queue length-based fair queuing in core-sateless networks[C]//Proc of IFIP Conference on Management of Multimedia Networks and Services. London: Springer-Verlag, 2001:535-539.

[10] BERTSEKAS D P, GALLAGER R. Data networks[M]. [S. l.]: Prentice Hall, 1992.

[11] XU Xin, TANG Kai, SHI Yan, *et al*. Performance analysis of dynamic bandwidth allocation scheme based on QoS in satellite networks[C]//Proc of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. 2010:1-6.

[12] JAWHAR I, WU J. Resource scheduling in wireless networks using directional antennas[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(9):1240-1253.

[13] KOUROSHNEZHAD S, ZOKAEI S, YEGANEH H, *et al*. Slot reservation demand assignment multiple access control protocol for signalling of telephony traffic via geo satellite[C]//Proc of the 10th International Conference on Advanced Communication Technology. 2008: 693-699.

[14] GOTTA A, POTORTI F, SECCHI R. Simulating dynamic bandwidth allocation on satellite links[C]//Proc of Workshop on ns-2: the IP Network Simulator. New York: ACM Press, 2006.

[15] JAWHAR I, WU Jie. Resource allocation for real-time and multimedia communications in TDMA-based wireless networks[J]. International Journal of Ad hoc and Ubiquitous Computing, 2009, 4(5): 304-319.

[16] JAWHAR I, WU Jie. Resource allocation in wireless networks using directional antennas[C]//Proc of the 4th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006:318-327.

[17] BAZAN O, JASEEMUDDION M. Routing and admission control for wireless Mesh networks with directional antennas[C]//Proc of IEEE Conference on Wireless Communicaions and Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009:1974-1979.

[18] CHEN Yuh-shyan, JAN Shin-jr, CHUANG Ming-chin. A shoelace-based QoS routing protocol for mobile Ad hoc networks using directional antenna[J]. Wireless Personal Communication, 2010, 54(2):361-384.

[19] CHIN Kwan-wu, SOH S, CHEN Meng. A novel spatial TDMA scheduler for concurrent transmit/receive wirless Mesh networks[C]//Proc of the 24th IEEE Conference on Advanced Information Networking and Application. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010:481-487.

[20] 单志龙,兰丽. Ad hoc 网络中基于定向天线的 MAC 协议[J]. 计算机工程, 2010, 36(2):21-24.

[21] BAO Li-chun, GARICA-LUNA-ACEVES J J. Transmission scheduling in Ad hoc networks with directional antennas[C]//Proc of the 8th Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2002:48-58.

[22] 孙宝林,李腊元. Ad hoc 网络 QoS 多播路由协议[J]. 计算机学报, 2004, 27(10):1402-1407.

[23] NS-2 simulator for satellite platform[EB/OL]. http://votos. isti. cnr. it/simulator. htm.

[24] ZHOU Yun-kai, SETHU H. A simulation study of relationships between delay jitter and properties of a switching network[C]//Proc of Applied Telecommunication Symposium. 2000.

[25] 张棋飞,刘威,孙宝林,等. 基于冲突分类模型的冲突解析算法[J]. 软件学报, 2010, 21(3):548-563.