

基于 OFDM 星载交换的星地下行链路跨层设计

党军宏 晏 坚 曹志刚

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘 要: 该文基于一种全新的基于 OFDM 的星载交换方案,给出了此星载交换方案的星地下行链路跨层设计工作流程和相关实现方法,此方法根据星地下行链路信号发射功率上限、关于每个地面设备的当前点波束星地下行链路信道状态、每个星地下行链路传输业务目的地、业务类型、业务传输速率要求等参数,实现在属于不同地面设备的各个星地下行链路传输业务之间自适应分配子载波并自适应配置每个子载波的调制制式,生成每个传输业务与子载波的对应关系,充分利用链路资源并满足传输业务的 QoS 要求。

关键词: 正交频分复用; 星载交换; 星地下行链路; 跨层设计

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)02-0301-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01420

Downlink Cross-layer Design for On-board Switch OFDM Based Scheme

Dang Jun-hong Yan Jian Cao Zhi-gang

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper proposes an downlink cross-layer design procedure and algorithm for On-board switch scheme based on OFDM. The ultimate objective is to maximize the system downlink throughput subject to spot beam downlink transmit power constraint, downlink channel state information about each user, bit error ratio requirement of subcarrier after signal detection by users, and destination user and QoS of each service. The algorithm can adaptively allocate subcarriers and chose modulation scheme for every subcarrier among different users and services. Simulation results show that the proposed algorithm is able to guarantee consistent degree of QoS for the same service.

Key words: OFDM; On-board switch; Downlink; Cross-layer design

1 引言

同步卫星一般产生多个点波束覆盖地面不同区域,在点波束之间采用星载交换技术进行传输交换。OFDM 已成为地面无线通信领域的核心技术,也将成为下一代卫星通信的核心技术之一^[1-3]。卫星通信采用 OFDM 技术,不仅能提高卫星通信自身性能,还将有利于 WiFi, WiMax, B3G 等地面无线通信系统与卫星通信系统的融合,使得地面无线终端有可能接入卫星网络。OFDM 技术将整个传输频段划分成多个子载波,各个子载波相互正交、频谱利用率高,而且 OFDM 的各个子载波可独立使用,所以可在点波束星地链路的各个传输业务和传输频带的各个子载波之间建立起对应关系,通过子载波交换实现业务交换,根据这个基本设想,本文作者已提出了一种全新的星载交换技术——基于 OFDM 星载交换^[4]。基于 OFDM 星载交换与现有的 FDM 子频带交换, TDM 时隙交换相比,具有更小、更灵

活的交换“粒度”,更高的频谱利用率;与现有的星载 ATM/IP 交换相比,又对传输业务的帧结构,信道编解码方式不敏感,具有更广的适用范围,并且基于 OFDM 星载交换能够支持不同类型业务的 QoS 要求,实现对点波束星地链路资源的统计复用。本文以星载交换后的点波束星地下行链路为研究对象,对点波束星地下行链路相关问题进行了研究。

2 基于 OFDM 星载交换的点波束星地下行链路需要解决的主要问题

设每个点波束覆盖区域内有多个地面设备与卫星同时进行星地上下行链路业务传输,且每个地面设备处于固定位置或采用“游牧式”工作方式,即每个地面设备在与卫星通信过程中处于静止状态,此时关于各个地面设备的点波束星地上下行链路信道可认为是慢变平坦衰落信道(高斯信道)或慢变频率选择性衰落信道(莱斯信道)^[5-7],而且每个地面设备与卫星同时传输多个各种类型业务。为了提高点波束星地上下行链路频谱利用率,点波束星地上下行链路均采用 OFDMA 实现多址接入,如图 1 所示。

2008-11-03 收到, 2009-11-05 改回

国家高技术研究发展计划(2007AA01z2b6)资助课题

通信作者: 党军岩 dangjh05@mails.tsinghua.edu.cn

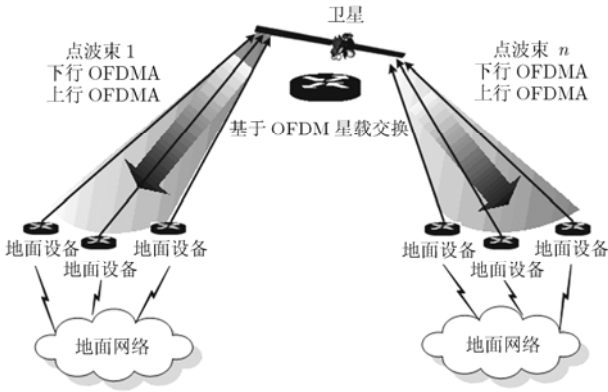


图 1 基于 OFDM 星载交换的应用示意图

如何建立属于某一个点波束覆盖区域内的不同地面设备的各个星地下行链路业务与该点波束星地下行链路子载波的对应关系,使得该点波束星地下行链路的传输容量最大化,并且支持每个传输业务的 QoS 要求,实现对卫星功率资源、频谱资源的统计复用是基于 OFDM 星载交换的点波束星地下行链路面临的主要问题。

3 点波束星地下行链路跨层设计

本文拟采用跨层设计方法解决该问题,跨层设计的本质是打破传统的通信系统框架,以满足传输业务的 QoS 要求为目的,将系统的资源状态参数和传输业务的 QoS 要求在协议层中传递,从而达到各协议层联合设计,充分利用系统资源,为用户提供更好服务的目的。但现有文献^[8-10]都是针对地面无线通信系统,在地面无线通信系统中,一个地面移动终端一般同一时刻只有一个下行链路传输业务,而在卫星通信系统一个地面设备有可能同时传输多个各种类型业务,处理过程更加复杂。

3.1 点波束星地下行链路跨层设计的基本思想和系统模型

本文中第 k 个点波束星下跨层设计的基本思想和系统模型如图 2 所示。第 k 个点波束星地下行链路跨层设计单元根据关于 J_k 个地面设备的当前星地下行链路信道状态信息、点波束星地下行链路发射功率上限 $P_{k,d}$ (物理层信息);该点波束覆盖区域内当前 $U_{k,d}$ 个星地下行链路传输业务的目的地面设备以及业务类型(本文分为 CBR、rt-VBR、nrt-VBR、UBR 等 4 种,应用层信息);当前时刻关于每个业务的 FIFO 缓存占用长度(体现了业务的实时传输速率要求,MAC 层信息),给各个星地下行链路业务分配子载波并确定每个子载波的调制制式,按照子载波分配信息和子载波调制制式对各个星地下行链路业务流进行排队、调制,生成点波束星地下行链

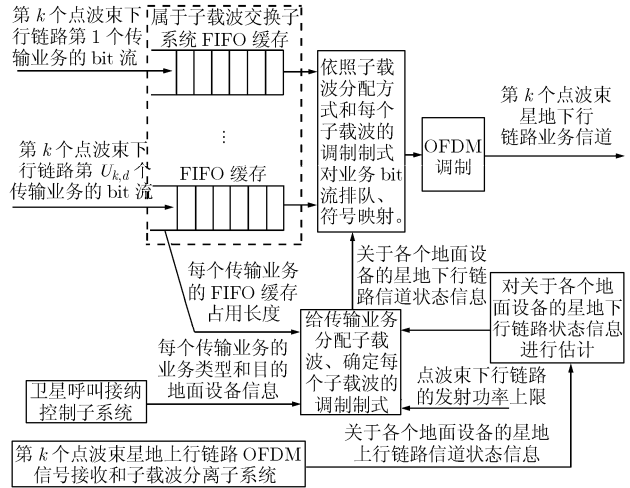


图 2 第 k 个点波束下行链路跨层设计工作流程

路业务传输帧,通过点波束星地下行链路业务信道传输给各个地面设备。

3.2 给各个星地下行链路业务分配子载波

跨层设计首先把子载波分配给各个地面设备并确定出每个子载波的调制制式,再把分配给某个地面设备的子载波分配给属于该地面设备的各个业务。

基于星地下行链路信道特点,为了减小星地下行链路业务传输帧中控制子帧的数据量,提高系统频谱效率,本文采用子载波块方式对各个地面设备分配子载波,且同一子载波块中的子载波调制制式相同,块交织分配与完全交织分配和连续块分配相比,能够兼顾不同地面设备的频率分集特性和便于分离属于不同地面设备的子载波两个方面的要求。对属于同一个地面设备的不同业务采用连续方式分配子载波。并且提出了基于该思想的星地下行链路业务信道传输帧结构,如图 3 所示。

帧头为 PN 序列,作为某个点波束的标示符,可用于每个传输帧的时间同步估计、频偏估计和信道估计。控制子帧 1、2 中 OFDM 符号的每个子载波都采用 BPSK 调制。控制子帧 1 如图 4 所示。

设 N_k 为第 k 个点波束星地上下行链路业务信道的子载波总数,把星地下行链路 N_k 个子载波分成 $2M_k$ 个子载波块, $M_k = \lfloor (N_k - 40) / 12 \rfloor$, 每个子载波块包含的子载波个数 $s_k = \lfloor N_k / 2M_k \rfloor$ 。第 m 个子载波块的相关参数用 $\{m, C_{k,d}(m), b_{k,d}(m)\}$ 表示, m 为该子载波块编号, $C_{k,d}(m)$ 为拥有该子载波块的地面设备编号, $b_{k,d}(m)$ 为该子载波块的每个子载波承载 bit 个数。控制子帧 2 的内容如图 6 所示。

对第 k 个点波束的每个星地下行链路业务采用连续分配方式分配子载波,第 u 个业务的子载波分配信息用 $\{G_{k,d}(u), N_k(u)\}$ 表示, $G_{k,d}(u)$ 为该业务编



图 3 点波束星地下行链路业务信道传输帧构成

图 4 图 3 中控制子帧 1 构成

图 5 图 4 中 OFDM 符号承载内容

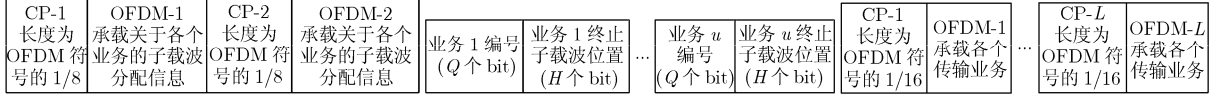


图 6 图 3 中控制子帧 2 构成

图 7 图 6 中 OFDM 符号承载内容

图 8 图 4 中业务子帧构成

号, 业务编号可分为两部分, 第 1 部分表示该业务属于哪个地面设备, 第 2 部分表示该业务是某个地面设备的哪一个业务。 $N_k(u)$ 为该业务终止子载波位置, 该业务起始子载波位置为属于同一个地面设备的前一个业务的终止子载波位置+1。每个传输帧可容纳 $V_{k,d} = \lfloor 2N_k / (Q + \log_2 N_k) \rfloor$ 个业务。

图 4 中的业务子帧的构成如图 8, 业务子帧中包含 L 个连续 OFDM 符号。

3.2.1 分配各个子载波块步骤

(1) 确定每个子载波块的所有可能调制制式(备选调制制式为 M-QAM) 把各个子载波块分配给不同地面设备时, 采用的子载波调制制式有可能不同, 所以必须确定出每个子载波块分配给不同的地面设备时, 可能采用的子载波调制制式。

给每个星地下行链路子载波分配相同发射功率, $p_{k,d} = P_{k,d} / N_k$, 设把第 m 个子载波块分配给第 j 个地面设备时每个子载波能够承载 $b_{k,d,j}(m)$ 个 bit, 确定 $b_{k,d,j}(m)$ 算法如下^[8]:

$$\max(b_{k,d,j,m}) = \left\lfloor \log_2 \left[1 - \frac{3p_{k,d} \left(\max_{(m-1)s_k \leq n \leq ms_k - 1} \{ |H_{k,d,j}(n)| \} \right)^2}{2(\ln(5\text{BER}_{\text{req}})) \sigma_{k,d,j}^2} \right] \right\rfloor \quad (1)$$

$$\min(b_{k,d,j,m}) = \left\lfloor \log_2 \left[1 - \frac{3p_{k,d} \left(\min_{(m-1)s_k \leq n \leq ms_k - 1} \{ |H_{k,d,j}(n)| \} \right)^2}{2(\ln(5\text{BER}_{\text{req}})) \sigma_{k,d,j}^2} \right] \right\rfloor \quad (2)$$

式(1), 式(2)分别是把第 m 个子载波块分配给第 j 个地面设备时, 子载波能够承载的最大 bit 个数和最小 bit 个数, 其中的 BER_{req} 为地面设备对星地下行链路子载波信号进行信号检测后的误比特率要求, 根据式(1), 式(2)再确定出 $b_{k,d,j}(m)$, 具体过程如下:

如果满足 $\max(b_{k,d,j,m}) = \min(b_{k,d,j,m})$,

则 $b_{k,d,j}(m) = \max(b_{k,d,j,m})$;

否则设 $b_{k,d,j}(m) = \max(b_{k,d,j,m})$,

$$\text{BER}_{k,d,j,m} = \frac{\sum_{n=(m-1)s_k}^{ms_k-1} \exp \left\{ \frac{3p_{k,d} |H_{k,d,j}(n)|^2}{2(1-2^{b_{k,d,j}(m)}) \sigma_{k,d,j}^2} \right\}}{5s_k} \quad (3)$$

如果满足 $\text{BER}_{k,d,j,m} > \text{BER}_{\text{req}}$,

则 $b_{k,d,j}(m) = b_{k,d,j}(m) - 1$,

返回式(3)继续执行;

否则执行完毕。

(2) 以使点波束星地下行链路总传输速率最大为原则, 对所有子载波块进行初始分配 设 $A_{k,d,j}$ 为已分配给第 $j(1 \leq j \leq J_k)$ 个地面设备的星地下行链路子载波块集合, $b_{k,d}(m)$ 为已分配子载波块的子载波调制制式, 以使第 k 个点波束星地下行链路的总传输速率最大为原则, 对子载波块进行初始分配, 具体算法如下:

初始化: $A_{k,d,j} = \Phi (1 \leq j \leq J_k)$

$$b_{k,d}(m) = 0 (1 \leq m \leq 2M_k), \text{ 令: } m = 1$$

$$j^* = \arg \max_{1 \leq j \leq J_k} \{ b_{k,d,j}(m) \} \quad (4)$$

执行过程: $A_{k,d,j^*} = A_{k,d,j^*} \cup \{m\}$

$$b_{k,d}(m) = b_{k,d,j^*}(m)$$

$m = m + 1$, 返回式(4), 直到 $m = 2M_k$ 。

(3) 计算属于各个地面设备的不同类型传输业务的总传输速率要求 当前存储第 k 个点波束的第 u 个星地下行链路传输业务的 FIFO 缓存占用长度为 $B_{k,d}(u)$, 为便于子载波分配, 规定当满足 $B_{k,d}(u) \geq L \cdot b_{k,d}(m^*)$ ($m^* = \arg \min_{1 \leq m \leq 2M_k} (b_{k,d}(m))$) 时, 才认为

第 u 个业务当前时刻有传输数据, 否则, 则认为该业务当前时刻无传输数据, 把当前时刻满足此条件的业务构成业务集合 $O'_{k,d}$, $O'_{k,d}$ 中业务个数为 $U'_{k,d}$ 。

(a) 如果 $U'_{k,d} > V_{k,d}$, 需要从 $O'_{k,d}$ 中筛选出 $V_{k,d}$ 个业务, 并把没有选中的业务从 $O'_{k,d}$ 中剔除, 然后进入(b); 具体筛选算法如下:

(a₁) 给业务集合 $O'_{k,d}$ 中不同类型业务分配相应

权植: $\alpha_{\text{CBR}} \geq \alpha_{\text{rtVBR}} \geq \alpha_{\text{nrtVBR}} \geq \alpha_{\text{UBR}}$;

(a₂) 把 $O'_{k,d}$ 中每个业务的 $B_{k,d}(u)$ 与相应权植相乘, 得到 $U'_{k,d}$ 个 $B_{k,d}(u) \cdot \alpha$;

(a₃) 对 $U'_{k,d}$ 个 $B_{k,d}(u) \cdot \alpha$ 按照从大到小排序, 筛选出前 $V_{k,d}$ 个业务, 把其他业务从 $O'_{k,d}$ 中剔除。

(b) 把 $O'_{k,d}$ 中的业务按照业务类型和每个业务的目的地面设备进行分类, 形成以下业务集合:

$O'_{k,d,\text{CBR},j} (1 \leq j \leq J_k)$, $O'_{k,d,\text{rtVBR},j} (1 \leq j \leq J_k)$,
 $O'_{k,d,\text{nrtVBR},j} (1 \leq j \leq J_k)$, $O'_{k,d,\text{UBR},j} (1 \leq j \leq J_k)$ 。则:

$$\text{CBR}_k(j) = \sum_{u \in O'_{k,d,\text{CBR},j}} B_{k,d}(u), \quad 1 \leq j \leq J_k \quad (5)$$

$$\text{rtVBR}_k(j) = \sum_{u \in O'_{k,d,\text{rtVBR},j}} B_{k,d}(u), \quad 1 \leq j \leq J_k \quad (6)$$

$$\text{nrtVBR}_k(j) = \sum_{u \in O'_{k,d,\text{nrtVBR},j}} B_{k,d}(u), \quad 1 \leq j \leq J_k \quad (7)$$

$$\text{UBR}_k(j) = \sum_{u \in O'_{k,d,\text{UBR},j}} B_{k,d}(u), \quad 1 \leq j \leq J_k \quad (8)$$

(4) 根据 $\text{CBR}_k(j) (1 \leq j \leq J_k)$ 调整初始子载波块分配 根据 $\text{CBR}_k(j) (1 \leq j \leq J_k)$ 对子载波块分配进行调整的目的是首先尽可能满足每个地面设备的 CBR 业务的传输速率要求, 具体过程如下:

设 $R_{k,d,j}$ 为已初始分配给第 j 个地面设备的所有子载波块能够达到的传输速率, 其初始值为

$$R_{k,d,j} = \sum_{m \in A_{k,d,j}} b_{k,d,j}(m) \cdot s_k, \quad 1 \leq j \leq J_k \quad (9)$$

设 $R'_{k,d,j}$ 为关于第 j 个地面设备的星地下行链路业务传输速率要求, 其初始值为

$$R'_{k,d,j} = \text{CBR}_k(j), \quad 1 \leq j \leq J_k \quad (10)$$

调整规则如下:

(a) 假设第 m 个子载波块已分配给第 j 个地面设备, $b_{k,d}(m) = b_{k,d,j}(m)$, 如果因把第 m 个子载波块分给其他地面设备而导致 $R_{k,d,j} - s_k \cdot b_{k,d,j}(m) < R'_{k,d,j}$, 则第 m 个子载波块不能重新分配给其他地面设备; 否则可以重新分配给其它地面设备。

(b) 每次子载波块重新调整分配导致总传输速率的减少量尽可能小; 子载波块重新分配的调整次数应越少越好。

规则(a)能够保证满足业务传输速率要求的地面设备越来越多, 规则(b)由函数 $e_{k,d,j}(m)$ 表示:

$$e_{k,d,j}(m) = (b_{k,d}(m) - b_{k,d,j}(m)) / b_{k,d}(m), \quad m \in W_{k,d} \quad (11)$$

$W_{k,d}$ 为可能需要重新分配的子载波块集合, 其值 $W_{k,d} = \{A_{k,d,j_1} \cup A_{k,d,j_2} \dots\}$ 且 $(R_{k,d,j_1} > R'_{k,d,j_1}, R_{k,d,j_2} > R'_{k,d,j_2}, \dots)$, 从 $j = 1$ 开始, 具体过程如下:

(b₁) 如果 $R_{k,d,j} \geq R'_{k,d,j}$ 成立, 则 $j = j + 1$ 且 $j \leq J_k$, 继续执行(b₁); 否则, 进入(b₂);

(b₂) 如果满足 $W_{k,d} \neq \phi$, 任取 $m \in W_{k,d}$, 计算 $e_{k,d,j}(m)$, 进入(b₃); 否则步骤(4)调整分配结束。

(b₃) 如果 $W_{k,d} \neq \phi$, 则 $m^* = \arg \min_{m \in W_{k,d}} \{e_{k,d,j}(m)\}$, 进入(b₄); 否则步骤(4)调整分配结束。

(b₄) 如果 $m^* \in A_{k,d,j^*}$ 且 $R_{k,d,j^*} - s_k \cdot b_{k,d,j^*}(m^*) \geq R'_{k,d,j^*}$ 成立, 则: $R_{k,d,j^*} = R_{k,d,j^*} - s_k \cdot b_{k,d,j^*}(m^*)$, $A_{k,d,j^*} = A_{k,d,j^*} - \{m^*\}$ 进入(b₅); 否则 $W_{k,d} = W_{k,d} - \{m^*\}$, 返回(b₃)。

(b₅) $R_{k,d,j} = R_{k,d,j} + s_k \cdot b_{k,d,j}(m^*)$, $A_{k,d,j} = A_{k,d,j} \cup \{m^*\}$, $b_{k,d}(m^*) = b_{k,d,j}(m^*)$, 返回(b₁);

经以上处理后, 对 $R'_{k,d,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 进行更新, 如果 $R_{k,d,j} \geq \text{CBR}_k(j) (1 \leq j \leq J_k)$, 则 $R'_{k,d,j} = R_{k,d,j} + \text{rtVBR}_k(j)$, 否则 $R'_{k,d,j} = R'_{k,d,j} + \text{rtVBR}_k(j)$, 并建立新的 $W_{k,d}$ 。

(5) 采用与步骤(4)相同原理和方法依次根据 $\text{rtVBR}_k(j)$, $\text{nrtVBR}_k(j)$, $\text{UBR}_k(j)$ 对子载波块分配进行再调整, 生成图5中的OFDM符号。

3.2.2 对某个地面设备的各个业务分配子载波 按照 CBR, rt-VBR, nrt-VBR, UBR 业务的顺序把属于某个地面设备的子载波子集中的子载波分配给该地面设备的各个业务。设 $O'_{k,d,\text{CBR},j}$ 表示 $O'_{k,d}$ 中属于第 j 个地面设备的 CBR 业务集合, $U'_{k,d,\text{CBR},j}$ 表示该业务集合的业务个数; 用 $F_{k,d,j}$ 表示属于第 j 个地面设备但还未分配给具体业务的子载波集合, $F_{k,d,j}$ 的初值为集合 $A_{k,d,j}$ 中的全部子载波, 把 $F_{k,d,j}$ 中的子载波按照子载波位置号从小到大排序, 用临时子载波位置号 $\{0, 1, \dots\}$ 标示, 并建立每个子载波实际位置号与临时位置号的影射表 $\eta_{k,d,j}$, 即临时位置号为 n 的子载波的实际位置号为 $\eta_{k,d,j}(n)$, 每个子载波承载 bit 个数用 $b_{k,d}(n)$ 表示。

(1) 给 $O'_{k,d,\text{CBR},j}$ 中业务分配子载波 如果 $U'_{k,d,\text{CBR},j} = 0$, 进入(2); 否则继续执行:

如果 $\sum_{u \in O'_{k,d,\text{CBR},j}} B_{k,d}(u) > L \cdot \sum_{n \in F_{k,d,j}} b_{k,d}(n)$, 则

$$B'_{k,d}(u) = \left\lfloor \frac{\sum_{n \in F_{k,d,j}} b_{k,d}(n)}{\sum_{u \in O'_{k,d,\text{CBR},j}} B_{k,d}(u)} \cdot B_{k,d}(u) \right\rfloor, \quad \forall u \in O'_{k,d,\text{CBR},j} \quad (12)$$

否则 $B'_{k,d}(u) = \lfloor B_{k,d}(u) / L \rfloor, \forall u \in O'_{k,d,\text{CBR},j}$ 。

式(12)处理体现了对同一类型业务的公平性传输原则, $B'_{k,d}(u)$ 为 $O'_{k,d,\text{CBR},j}$ 中某个业务在一个 OFDM 符号中可能被传输的 bit 个数。对业务集合 $O'_{k,d,\text{CBR},j}$ 中 $U'_{k,d,\text{CBR},j}$ 个业务按照 $B'_{k,d}(u)$ 从大到小进行排序, 把重新排序后的每个业务用临时业务编号集合

$\chi = (1, 2, \dots, U'_{k,d,CBR,j})$ 表示, 并建立临时业务编号与真实业务编号的映射表 ψ , 即临时业务编号为 u' 的业务真实业务编号为 $\psi(u')$ 。进入以下操作:

设如果子载波位置 $Y_{k,d,j,u'} (\forall u' \in \chi)$ 满足:

$$\sum_{n=\min\{F_{k,d,j}\}}^{Y_{k,d,j,u'}} b_{k,d}(n) \leq B'_{k,d}(u') \text{ 且} \\ \sum_{n=\min\{F_{k,d,j}\}}^{Y_{k,d,j,u'}+1} b_{k,d}(n) > B'_{k,d}(u'), \forall u' \in \chi \quad (13)$$

则

$$e(u') = B'_{k,d}(u') - \sum_{n=\min\{F_{k,d,j}\}}^{Y_{k,d,j,u'}} b_{k,d}(n), \quad \forall u' \in \chi \quad (14)$$

$$u'^* = \arg \min_{u' \in \chi} \{e(u')\} \quad (15)$$

需要说明的是: 如果 $e(u') (u' \in \chi)$ 中有多个相同最小值, 则 u'^* 为其中最小的 u' 值。

把第 $\eta_{k,d,j}(\min\{F_{k,d,j}\})$ 个到第 $\eta_{k,d,j}(Y'_{k,d,j,u'^*})$ 个且属于子载波子集 $A_{k,d,j}$ 中的子载波分配给第 $\psi(u'^*)$ 个业务, $F_{k,d,j} = F_{k,d,j} - \{\min\{F_{k,d,j}\}, \dots, Y'_{k,d,j,u'^*}\}$, $\chi = \chi - \{u'^*\}$, $O'_{k,d,CBR,j} = O'_{k,d,CBR,j} - \{\psi(u'^*)\}$ 。依次类推, 直到给 $O'_{k,d,CBR,j}$ 中所有业务都分配了子载波。如果 $F_{k,d,j}$ 中还有剩余子载波, 则进入(2); 否则针对第 j 个地面设备的各个星地下行链路业务的子载波分配过程结束。

(2) 采用与(1)相同方法依次给第 j 个地面设备的其他类型星地下行链路业务分配子载波。

(3) 根据子载波分配信息生成图 8 中 OFDM 符号。

(4) 根据子载波分配信息和子载波调制制式信息对传输业务 bit 流进行排队、符号影射、生成各个子载波信号, 用 IFFT 把所有子载波信号调制成 L 个完整 OFDM 符号, 插入相应 CP, 形成业务子帧, 把帧头、控制子帧 1 和 2、业务子帧构成点波束星地下行链路业务信道传输帧, 发送给各个地面设备。

4 仿真

4.1 针对 3.2.1 节方法的性能仿真

(1) 采用表 1 的仿真参数, 令执行完本文 3.2.1 方法的步骤(1)、步骤(2)后的某个点波束星地下行链路的总传输速率为 $B_{a,r}$ 和关于每个地面设备的总传输速率为 $B_{a,r,j} (1 \leq j \leq J_k)$; 令采用固定设置每个子载波的调制制式时该点波束星地下行链路的总传输速率为 $B_{c,r}$ 和关于每个地面设备的总传输速率为 $B_{c,r,j} (1 \leq j \leq J_k)$; 令该点波束星地下行链路的最大可能总传输速率(即每个子载波块包含的子载波个数为 1)为 $B_{a,d}$ 和关于每个地面设备的总传输速率为

表 1 仿真参数 1

点波束星地下行链路业务信道子载波个数	1024
每个 OFDM 符号持续时间	25.6 μs
每个 OFDM 符号的循环前缀持续时间	3.2 μs
L	16
J_k	4
针对地面设备 1 的星地下行链路信道模型	莱斯因子 = 40
针对地面设备 2 的星地下行链路信道模型	莱斯因子 = 45
针对地面设备 3 的星地下行链路信道模型	莱斯因子 = 44
针对地面设备 4 的星地下行链路信道模型	莱斯因子 = 46
子载波信号检测后误比特率要求	0.0005

$B_{a,d,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 。把 $B_{a,r}$, $B_{a,r,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 与 $B_{c,r}$, $B_{c,r,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 以及 $B_{a,d}$, $B_{a,d,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 进行比较, 仿真结果如表 2 所示。

表 2 3.2.1 节方法仿真结果 1

SNR(dB)	0	3	6	9	12	15
$B_{c,r}$	0	3.875	27.66	50.93	70.68	101.84
$B_{c,r,1}$	0	0.96	6.76	12.06	14.62	24.76
$B_{c,r,2}$	0	0.97	7.02	13.05	18.7	25.86
$B_{c,r,3}$	0	0.965	6.86	12.78	18.62	25.32
$B_{c,r,4}$	0	0.98	7.02	13.05	18.74	25.9
(Mbps)						
$B_{a,r}$	0	5.2	30.9	56.6	87.55	110.45
$B_{a,r,1}$	0	1.285	7.6	13.4	21.6	26.8
$B_{a,r,2}$	0	1.30	7.8	14.5	22.0	28.0
$B_{a,r,3}$	0	1.30	7.7	14.2	21.9	27.4
$B_{a,r,4}$	0	1.315	7.8	14.5	22.05	28.05
(Mbps)						
$B_{a,d}$	0	5.4	31.1	56.9	88.05	110.8
$B_{a,d,1}$	0	1.345	7.66	13.55	21.8	27.05
$B_{a,d,2}$	0	1.355	7.84	14.55	22.1	28.1
$B_{a,d,3}$	0	1.35	7.75	14.25	22.0	27.5
$B_{a,d,4}$	0	1.35	7.85	14.55	22.15	28.15
(Mbps)						

从表 2 仿真结果可以看出, 当信道为莱斯信道时, 在不同的信噪比条件下, $B_{a,r}$ 和 $B_{a,r,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 比 $B_{c,r}$ 和 $B_{c,r,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 高 9%~25%; $B_{a,r}$ 和 $B_{a,r,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 与 $B_{a,d}$ 和 $B_{a,d,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 基本保持一致, 这也就验证了对各个地面设备采用块状方式分配子载波, 且同一子载波块中的子载波调制制式相同这一设想的可行性。

(2) 把执行完 3.2.1 节方法的步骤(3)、步骤(4)后的某个点波束星地下行链路的总传输速率 $B'_{a,r}$ 以及 $B'_{a,r,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 与 $B_{a,r}$ 以及 $B_{a,r,j} (1 \leq j \leq J_k)$ 比较, 仿真参数如表 3。

表 3 3.2.1 节方法仿真参数 2(SNR=15 dB)

不同类型业务的 总传输速率要求	地面 设备 1	地面 设备 2	地面 设备 3	地面 设备 4
CBR(Mbps)	6	5	6	7
rtVBR(Mbps)	7	8	8	6
nrtVBR(Mbps)	8	6	8	5
UBR(Mbps)	6	6	8	7
所有业务的总传输 速率(Mbps)	27	25	30	25

仿真结果如表 4 所示。

表 4 3.2.1 节方法仿真结果 2

$B'_{a,r,1}$ (Mbps)	$B'_{a,r,2}$ (Mbps)	$B'_{a,r,3}$ (Mbps)	$B'_{a,r,4}$ (Mbps)	$B'_{a,r}$ (Mbps)
27.2	25.1	29.6	25.05	106.95

从表 4 的仿真结果可以看出, 3.2.1 节方法的步骤(3)、步骤(4)能够在一定程度上满足各个地面设备的业务传输速率要求, 并且使因重新调整子载波块分配而导致总传输速率的减少量尽可能小。

4.2 针对 3.3.2 节方法的性能仿真

在 3.2.1 节方法仿真基础上, 对 3.2.2 节方法性能进行仿真, 对 4 个地面设备分别分配 5 个传输业务, 第 1 个业务为 CBR 业务, 第 2 个业务为 rt-VBR 业务, 第 3 个业务为 nrt-VBR 业务, 第 4、5 个业务为 UBR 业务。对这 20 个传输业务从卫星传输到目的设备的整个过程进行仿真, 仿真中不考虑差错重传, 仿真时间设为 10 s, 检验每个业务的平均星地下行链路传输延时。每个业务的传输延时不包括星地下行链路的传输延时(135 ms)。仿真结果见表 5。

表 5 各个业务的平均传输延时

地面 设备	业务 1	业务 2	业务 3	业务 4	业务 5
	平均 延时(s)	平均 延时(s)	平均 延时(s)	平均 延时(s)	平均 延时(s)
1	8.76E-6	9.20E-6	1.00E-5	1.11E-5	1.12E-5
2	8.78E-6	9.21E-6	1.01E-5	1.11E-5	1.11E-5
3	8.79E-6	9.23E-6	1.02E-5	1.12E-5	1.11E-5
4	8.75E-6	9.22E-6	1.01E-5	1.11E-5	1.10E-5

仿真表明子载波分配方法能有效支持各种业务类型, CBR 业务的传输延时小于其他业务, 依次类推。

5 结论

本文基于一种全新的基于 OFDM 的星载交换

方案, 给出了此星载交换方案的星地下行链路工作流程和相关跨层设计实现方法, 该方法可依据当前关于各个地面设备的星地上行链路信道状态对当前关于各个地面设备的星地上行链路信道状态进行估计, 并能实时生成每个传输业务与子载波的对应关系, 充分利用链路资源并尽可能满足传输业务 QoS 要求。

参考文献

- [1] De Gaudenzi R. R&D directions for next generation broadband multimedia systems: an Esa perspective[C]. 9th Ka and Broadband Communications Conference, Lacco Ameno, Italy, November 5-7, 2003: 764-769.
- [2] Falconio P, Catania F, and Amatol M. High quality audio services over a L-band satellite link using COFDM with soft-decision[C]. Proceedings of the IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Berlin, Germany, Sep, 2005: 2252-2256.
- [3] 张琛, 付耀文, 张尔扬. QAM-OFDM 卫星通信系统 PAPR 抑制方法研究[J]. 通信学报, 2006, 27(8): 67-72.
Zhang Chen, Fu Yao-wen, and Zhang Er-yang. Research on PAPR reduction scheme in QAM-OFDM satellite communication system[J]. *Journal on Communications*, 2006, 27(8): 67-72.
- [4] 党军宏, 晏坚, 曹志刚. 一种基于 OFDM 和跨层设计的星载交换系统[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1086-1094.
Dang Jun-hong, Yan Jian, and Cao Zhi-gang. An on-board switch scheme based on OFDM and cross-layer design[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 1086-1094.
- [5] Wen W K and Z Y P. Transmit beam-tracking algorithm in FDD DMA cellular wireless system[J]. *IEE Electronics Letter*, 2004, 40(13): 814-816.
- [6] Fontan F, Castro M A, Cabado C, and Garcia J. Statistical modelling of the LMS channel[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2001, 50(6): 1549-1567.
- [7] Scalise S, Mura R, and Mignone V. Air interfaces for satellite based digital TV broadcasting in the railway environment[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2006, 52(2): 158-166.
- [8] Zhang G. Subcarrier and bit allocation for real-time services in multiuser OFDM systems[C]. IEEE ICC'04, Paris, France, June 20-24, 2004: 2895-9298.
- [9] Yu G, Zhang Z, and Chen Y, et al. A novel resource allocation algorithm for for real-time services in multiuser OFDM systems[C]. IEEE VTC'06, Melbourne Australia, May 7-10, 2006: 1057-1062.
- [10] Wong I C and Evans B L. Optimal downlink OFDMA resource allocation with linear complexity to maximize ergodic rates [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2008, 7(3): 962-971.

党军宏: 男, 1976年生, 讲师, 博士生, 研究方向为卫星通信。

晏坚: 男, 1975年生, 讲师, 研究方向为卫星通信。

曹志刚: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要从事通信与信息系统研究。