基于雨衰环境下的多波束卫星资源分配策略

于 佳 宗 鹏

(南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016)

摘 要: 针对雨衰对高频段的卫星通信造成的不利影响,采用自适应前向纠错编码(FEC,Forward Error Correction)使传输的信息量减少,提出了一种雨衰下的自适应信道分配的策略.该方法是采用调整冗余信道来保障信息信道的传输量以满足系统对误码率的要求,达到可靠和有效地利用有限的卫星信道资源的目的.通过仿真分析了该策略针对不同的频段和降雨情况下对呼叫产生的影响,分析中考虑了话音业务享有比数据业务更高的优先权.仿真结果表明利用冗余信道传输用于纠错的冗余信息可以保证在不产生通信中断的前提下,可以满足系统对信道误码率的要求.

关 键 词: 资源分配; 雨衰; 自适应编码; 通信链路; 误码率

中图分类号: TN 927

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)03-0291-06

Resource allocation scheme under rain fading in multi-beam mobile satellite systems

Yu Jia Zong Peng

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An efficient dynamic resource calculation algorithm applicable to satellite networks was presented. The rain attenuation was taken into account, and adaptive forward error correction(FEC) coding technology was used to mitigate the decrease in signal to noise ratio caused by rain. In order to guarantee the information date rate and bit error rate, the proposed scheme adaptively increases the number of channels to transmit more information date. The algorithm's performance was validated through simulation of different rain rates and frequencies, and the theoretical analysis and simulation results were matched perfectly.

Key words: resource allocation; rain attenuation; adaptive coding; communication link; bit error rate

由于卫星通信具有系统设计灵活和覆盖范围大等优点,卫星通信将是机动和大范围通信的最佳的选择,尤其对于没有地面网络的区域和相距较远的用户.由于低轨卫星相比高轨卫星来说轨道低、通信时延小,可以与低功率的手持终端提供直接通信,因此小型手持移动终端在提供全球实时通信方面有很多特有的优点.而且,低轨卫星地面覆盖是多小区蜂窝覆盖,可以提供比高轨卫星更多的业务容量.但是,卫星通信是一个开放的通信系统, 其通信链路易受外部条件的影响, 比如雨衰的影响[1-2],尤其在高频段通信中,雨衰对通信质量的影响更为严重.

许多文献研究信道分配方法都是基于理想的通信环境[3-4],没有考虑到突发情况对信道带来的影响.本文针对雨衰的情况,提出了一种在雨衰情况下应用的信道分配方法,仿真结果表明,新的分配方法能有效的缓解雨衰的影响,保证通信的质量.

1 理论分析

在具有多个点波束的 LEO(Low Earth Orbit)卫星通信系统中,每个点波束在地面的投影区都

收稿日期: 2010-11-20; **网络出版时间**: 2012-03-28 15:12

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120328.1512.001.html

作者简介: 于 佳 (1985-),女,江苏金坛人,博士生,yujiahahaha@126.com.

是一个小区,假设每个小区的可用总带宽为 C. 在话音业务和数据业务并存的条件下,根据各业务所处状态的不同,将其分成了话音新呼叫、话音切换呼叫、数据新呼叫和数据切换呼叫,它们到达率分别为服从参数:λ_{nv}, λ_{hv},λ_{nd},λ_{hd}的泊松分布,服务时间服从负指数分布. $1/\mu_d$ 和 $1/\mu$ 分别为数据业务和话音业务的平均服务时间. 各类型呼叫对时延的要求不同,话音的优先级要高于数据业务,如果在总带宽为 C 的情况下,数据业务只能使用的带宽值为 K,而剩下的 C-K 的带宽只为话音业务服务,保证了话音业务的优先权. 另外,由于雨衰的影响,造成了有用信息传输量的减少,本文采用了冗余信道保障技术,该技术是通过增加带宽和自适应编码的方式,既保证了有用信息传输量,又满足了系统对误码率的要求.

1.1 系统模型

卫星信道的时变特性不但会影响接收数据的正确性,还会影响上行及下行链路的信噪比变化. 在传输链路上根据不同的信噪比采用相应的信道编码方式可以保证信道的误码率. 将每种编码组合称为一种模式,每种模式都有相应的信噪比范围,划分为:$[\delta_0, \delta_1]$, $[\delta_1, \delta_2]$,…,$[\delta_{L-1}, \delta_L]$共 L 个区间.

本文为了缓解雨衰对通信质量的影响,采用了多种前向纠错(FEC, Forward Error Correction)信道编码方式. 图 1 是 FEC 编码的信噪比与误码率的关系图.

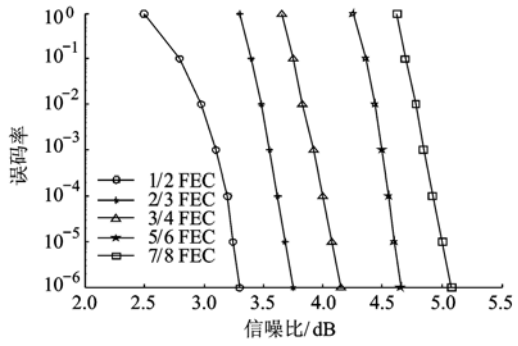

图 1 FEC 编码信噪比与误码率关系图

不同的信噪比区间选择不同编码方式,由于话音和数据业务对误码率的要求不同,话音业务能承受的最大误码率为 10^{-3},数据业务能承受的最大误码率为 10^{-5},因此选择编码模式也不同. 表 1 中给出了信噪比范围和编码模式的对应关系. 为了要保证有用信息的传输速率,因此不同的编码模式要求不同的信道带宽的补偿. 其中 $E(t)$ 为话音业务的信道带宽补偿比例,$F(t)$ 为数据业务的信道带宽补偿比例,B_v 为话音业务的占用带宽,B_d 为数据业务的占用带宽,雨衰下的占用带宽表示如下.

$$\left.\begin{aligned} B_v &= (1 + E(t))B_{sv} \\ B_d &= (1 + F(t))B_{sd} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中,B_{sv}为晴天下话音业务的占用带宽;B_{sd}为晴天下数据业务的占用带宽.

对用户来说,话音业务的中断比数据业务更加难以接受,因此,为了保证话音业务的优先权,首先,在话音与数据业务同时到达时,接入话音业务的概率远大于数据业务.

$$P_{voice} \gg P_{data} \tag{2}$$

其次,话音业务能使用小区中全部带宽 C,数据业务只能占用带宽 K,这样保证了即使有大量数据业务到达小区时,仍有 C-K 的带宽可供话音业务使用,保证了话音业务的高优先级.

在晴天的情况下,当空闲带宽小于带宽 C 时,话音业务可以接入小区,空闲带宽小于 K 时,数据业务可以接入小区,表示如下:

$$\left.\begin{aligned} B_{sv} &\leqslant C - (iB_{sv} + jB_{sd}) \\ B_{sd} &\leqslant K - (iB_{sv} + jB_{sd}) \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中 i, j 为小区中当前使用的话音和数据业务的数量. 在雨天的情况下,表示如下:

$$\left.\begin{aligned} (1 + E_{(i+1)}(t))B_{sv} &\leqslant C - \sum_{k=1}^{i}(1 + E_k(t))B_{sv} - \sum_{k=1}^{j}(1 + F_k(t))B_{sd} \\ (1 + F_{(j+1)}(t))B_{sd} &\leqslant K - \sum_{k=1}^{i}(1 + E_k(t))B_{sv} - \sum_{k=1}^{j}(1 + F_k(t))B_{sd} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

表 1 信噪比范围和编码模式的对应关系

编码方式	语音业务信噪比范围	数据业务信噪比范围
1/2 FEC	[3.1 dB,3.6 dB]	[3.4 dB,3.8 dB]
2/3 FEC	[3.1 dB,4 dB]	[3.8 dB,4.2 dB]
3/4 FEC	[4 dB,4.6 dB]	[4.2 dB,4.6 dB]
5/6 FEC	[4.6 dB,5 dB]	[4.6 dB,5.2 dB]
7/8 FEC	5 dB 以上	5.2 dB 以上

1.2 数学分析

在给出误码率的最低标准后,每个时刻的信道补偿比例给定,晴天下小区中能容纳的话音和数据业务的数量为

$$\left.\begin{aligned} m &= [C/B_{sv}] \\ n &= [K/B_{sd}] \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中,$[X]$为取整;S 为小区中业务占用信道的状态空间.

$$S=\{(i,j)\mid i+aj\leqslant m,0\leqslant j\leqslant n\} \tag{6}$$

式中,a 为数据业务占用的信道与话音业务占用带宽之比.

二维马尔可夫过程如图 2 所示,$q(i,j;i',j')$ 表示从状态(i,j)转移到(i',j')的概率,其中,在雨天的情况下,概率为

$$\left.\begin{aligned} q(i,j;i-1,j)&=i\mu_{\mathrm{v}} \quad 0\leqslant i\leqslant m,0\leqslant j\leqslant n\\ q(i,j;i+1,j)&=(\lambda_{\mathrm{nv}}+\lambda_{\mathrm{hv}})\pi_{\mathrm{v}}(i,j;i+1,j)\\ &0\leqslant i\leqslant m,0\leqslant j\leqslant n\\ q(i,j;i,j-1)&=i\mu_{\mathrm{d}} \quad 0\leqslant i\leqslant m,0\leqslant j\leqslant n\\ q(i,j;i,j+1)&=(\lambda_{\mathrm{nd}}+\lambda_{\mathrm{hd}})\pi_{\mathrm{d}}(i,j;i,j+1)\\ &0\leqslant i\leqslant m,0\leqslant j\leqslant n \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

$$\left.\begin{aligned} \pi_{\mathrm{v}}(i,j;i+1,j)&=\Pr\{(1+E_{i+1}(t))B_{\mathrm{sv}}\}\leqslant C-\\ &\left(\sum_{k=1}^{i}(1+E_k(t))B_{\mathrm{sv}}+\sum_{k=1}^{j}(1+F_k(t))B_{\mathrm{sd}}\right)\\ \pi_{\mathrm{d}}(i,j;i,j+1)&=\Pr\{(1+F_{i+1}(t))B_{\mathrm{sd}}\}\leqslant K-\\ &\left(\sum_{k=1}^{i}(1+E_k(t))B_{\mathrm{sv}}+\sum_{k=1}^{j}(1+F_k(t))B_{\mathrm{sd}}\right) \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中,$\pi_{\mathrm{v}}(i,j;i+1,j)$表示新到达了语音呼叫时,有足够带宽能够接入新呼叫的概率,$\pi_{\mathrm{v}}(i,j;i,j+1)$表示新到达了数据呼叫时,有足够带宽能够接入新呼叫的概率.

由于新呼叫和切换呼叫优先级相同,所以切换失败率和新呼叫阻塞率相同.

话音业务的新呼叫阻塞率(切换失败率)为

$$P_{\mathrm{Bv}}=\sum_{i=0}^{m-an}\sum_{j=0}^{n}p(i,j)[1-\pi_{\mathrm{v}}(i,j;i+1,j)]+\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=\substack{m-a(\\ n-k+1)+1}}^{m-a(n-k)}\sum_{j=0}^{n-k}p(i,j)[1-\pi_{\mathrm{v}}(i,j;i+1,j)] \tag{9}$$

数据业务的新呼叫阻塞率(切换失败率)为

$$P_{\mathrm{Bd}}=\sum_{i=0}^{m-an}\sum_{j=0}^{n}p(i,j)[1-\pi_{\mathrm{d}}(i,j;i,j+1)]+\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=\substack{m-a(\\ n-k+1)+1}}^{m-a(n-k)}\sum_{j=0}^{n-k}p(i,j)[1-\pi_{\mathrm{d}}(i,j;i,j+1)] \tag{10}$$

式中 $p(i,j)$为处于状态(i,j)概率.

$$p(i,j)=p(0,0)\cdot\frac{(\lambda_{\mathrm{nv}}+\lambda_{\mathrm{hv}})^i}{i!\mu_{\mathrm{v}}^i}\cdot\frac{(\lambda_{\mathrm{nd}}+\lambda_{\mathrm{hd}})^j}{j!\mu_{\mathrm{d}}^i}$$

$$0\leqslant j\leqslant n\qquad i+aj\leqslant m$$

$$p(0,0)=\left[\sum_{\substack{0\leqslant j\leqslant n\\ i+aj\leqslant m}}\frac{(\lambda_{\mathrm{nv}}+\lambda_{\mathrm{hv}})^i}{i!\mu_{\mathrm{v}}^i}\cdot\frac{(\lambda_{\mathrm{nd}}+\lambda_{\mathrm{hd}})^j}{j!\mu_{\mathrm{d}}^j}\right]^{-1}=\left[\sum_{j=0}^{n}\frac{(\lambda_{\mathrm{nd}}+\lambda_{\mathrm{hd}})^j}{j!\mu_{\mathrm{d}}^j}\sum_{i=0}^{m-aj}\frac{(\lambda_{\mathrm{nv}}+\lambda_{\mathrm{hv}})^i}{i!\mu_{\mathrm{v}}^i}\right]^{-1} \tag{11}$$

1.3　通信链路的计算

$E(t)$与 $F(t)$为话音和数据业务的信道带宽补偿比例,它们的取值取决于当前状态下所选的编码方式,而编码方式的选择取决于当前链路的信噪比,雨衰是主要影响信噪比的因素,因此,$E(t)$与 $F(t)$的取值主要取决于雨衰.

链路信噪比的计算为

$$\frac{E_{\mathrm{b}}}{N_0}=P_{\mathrm{t}}+G_{\mathrm{t}}+L_{\mathrm{p}}+L_{\mathrm{m}}+G_{\mathrm{c}}+G_{\mathrm{r}}-10\log(B)-10\log(KT)-A \tag{12}$$

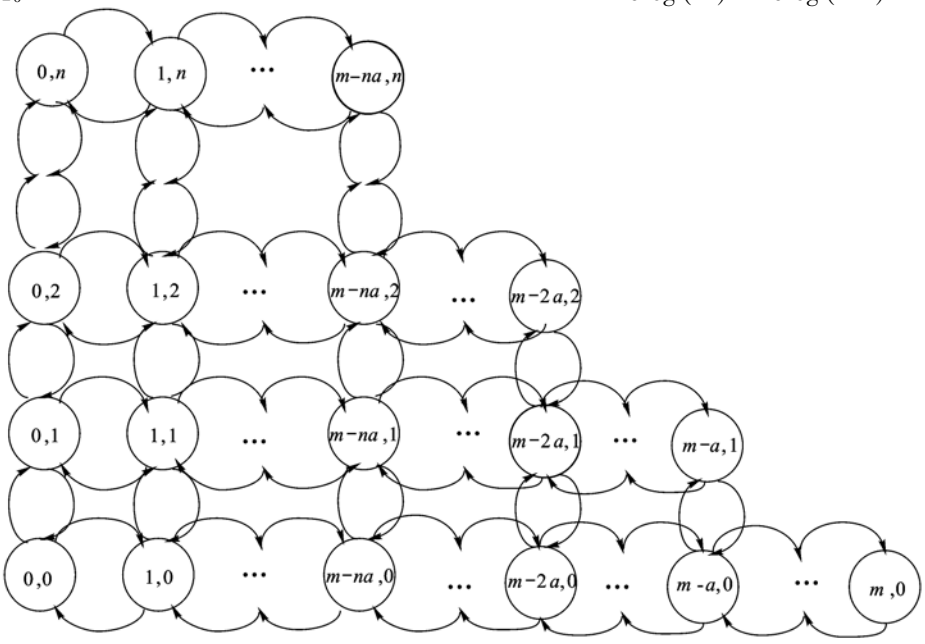

图 2　二维马尔可夫状态图

式中，P_t 为发射功率；G_t 为发射天线的增益；L_P 为自由空间链路损耗；L_m 为其他杂损；G_c 为编码增益；G_r 为接收天线增益；B 为带宽；K 为玻尔兹曼常数；T 为噪声温度；A 为雨衰. 除了雨衰是不可预知的，其他参数均为可预知的值.

雨衰的计算如下：

$$A_{th} = (E_b/N_0)_{cs} - (E_b/N_0)_{th} \tag{13}$$

式中，A_{th} 为此刻能承受的最大雨衰值；$(E_b/N_0)_{cs}$ 是晴天下的信噪比；$(E_b/N_0)_{th}$ 是达到误码率门限的最小信道比.

由于雨衰随着时间在变化，令呼叫持续时间为 T_s，通信结束时刻，雨衰为

$$A_{(t_0+T_s)} = (E_b/N_0)_{C_s(t_0+T_s)} - (E_b/N_0)_{(t_0+T_s)} \tag{14}$$

通信开始时刻的雨衰为

$$A_{t_0} = (E_b/N_0)_{cs} - (E_b/N_0)_{t_0} \tag{15}$$

在文献[5]中给出了两个不同时刻的雨衰值的关系为

$$f_{A_{t_0}A_{(t_0+T_s)}}(A_{t_0}, A_{(t_0+T_s)}, T_s) = \frac{1}{2\pi S_a^2 A_{t_0} A_{(t_0+T_s)}} \exp\left[-\frac{1}{2}Q(A_{t_0}, A_{(t_0+T_s)}, T_s)\right] \tag{16}$$

式中，$Q(x)$，S_a 的计算在文献[4]中均已给出. 计算出雨衰值，即可得到信噪比. 根据当前的信噪比值，找到对应信噪比区间的信道编码模式，算出 $E(t)$ 与 $F(t)$ 值，根据式(3)判断小区是否有足够的空闲信道能够容纳新呼叫或切换呼叫，最后选择接受或者拒绝呼叫.

2 仿真结果

仿真的模型以低轨卫星中的铱星为例，铱星系统网络模型的建立在之前的研究中已经完成[5]，使用的仿真参数如表 2 所示，话音业务能承受的最大误码率为 10^{-3}，数据业务能承受的最大误码率为 10^{-5}[6]，1/2FEC，2/3FEC，3/4FEC，5/6FEC，7/8FEC 编码的补偿比例 $E(t)$（或 $F(t)$）分别为 1，1/2，1/3，1/5，1/7. 因为话音业务优先级高于数据业务，在总带宽中，数据业务只能使用其中 80% 的信道.

本仿真的终端分布在南京地区，仿真南京的业务情况，南京的降雨量为年平均 60 mm/h，海拔 8.9 m.

上行链路和下行链路均采用 MF-TDMA 接入方式. 铱星系统的总带宽为 10.5 M，其中时分多址（TDMA，Time Division Multiple Access）和频分多址（FDMA，Frequency Division Multiple Access）结构如图 3 所示. 图中 UL1，UL2，UL3，UL4 为上行链路时隙，DL1，DL2，DL3，DL4 为下行链路时隙. 上行链路和下行链路的资源分配方法是一样的，因此在仿真中只讨论上行链路的资源分配.

表 2 仿真参数

参数	值
子帧时隙数	上行 4 个，下行 4 个
话音业务时隙数	1
数据业务时隙数	2
新呼叫和切换呼叫到达分布	泊松分布
新呼叫和切换呼叫持续时间分布	负指数分布
语音呼叫平均持续时间/s	180
数据呼叫平均持续时间/s	540
话音数据业务到达率	7 ~ 12 爱尔兰

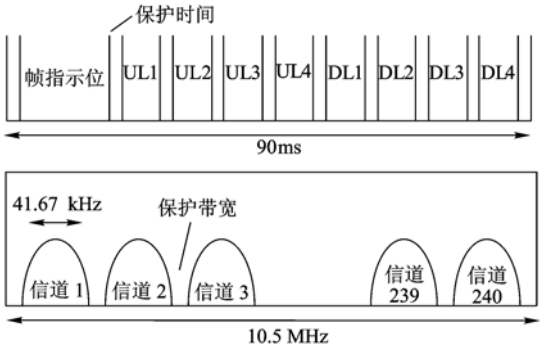

图 3 铱星 TDMA 与 FDMA 结构示意图

每颗铱星有 48 个波束，每个波束有 240/48 = 5 个频率，因为频率复用因子为 12，因此每个波束有 240/12 = 20 个频率，可用上行链路有 4 个时隙，下行链路有 4 个时隙，因此每个波束的上行链路的可用信道有 20 × 4 = 80 个信道. 每个频率一个信道，每个单独的频率信道由 4 个 TDMA 时隙组成. 整个资源的分布可以用一个二维阵列来表示，图 4 是上行链路一个卫星覆盖下 48 个波束中一个波束的资源分布图.

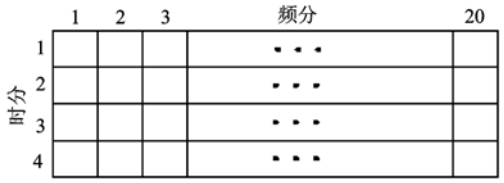

图 4 资源分配图

带宽调整过程如图 5 所示.

由图 6 和图 7 可以看出新呼叫阻塞率和切换失败率随着业务量和频率的增加而增加，话音业务的新呼叫阻塞率在 0.17 ~ 0.42 之间变化（不同频率），而数据业务的阻塞率在 0.58 ~ 0.9 之间变化. 话音的切换失败率在 10^{-5} ~ 2×10^{-4} 之间变化，而数据业务的切换失败率在 5×10^{-4} ~ $2 \times$

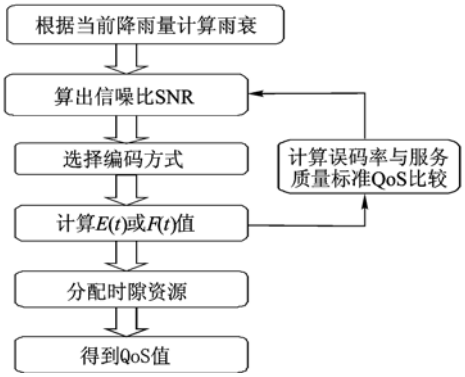

图 5　自适应信道分配流程图

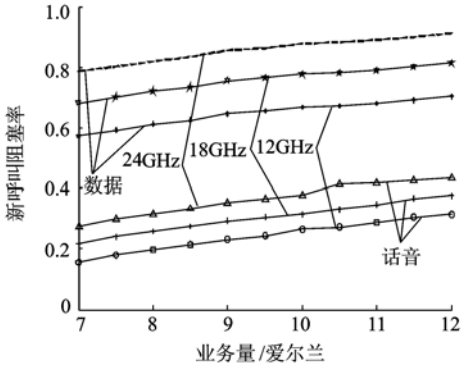

图 6　不同频率下话音数据业务新呼叫阻塞率

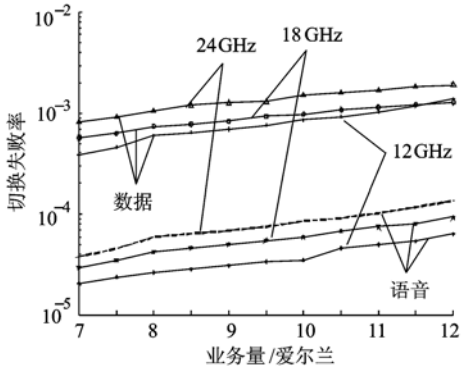

图 7　不同频率下话音数据业务切换失败率

10^{-3}之间变化. 话音业务的新呼叫阻塞率和切换失败率比数据业务小,首先因为话音业务享有比数据业务更高的优先权,且同样的环境下占用的信道少,其次因为话音持续时间小于数据业务持续时间. 满足了用户对话音业务的低切换率的要求. 图 8 中信道利用率随业务量的增加而增加,随频率增加而减少. 业务量越多,新造资源中空闲的信道越少,因此信道利用率越高. 频率越高,雨衰越大,为了保证有用信息的传输量,动态增加的信道数越多,因此导致新呼叫的阻塞率,切换失败率的上升和信道利用率的下降. 本文仿真的是南京地区的业务情况,降雨量取的是 60 mm/h. 如果降雨量不限制,而频率定在 12 GHz,那么降雨量最高可以达到 150 mm/h(不同频率下最大降雨量的结果也不同).

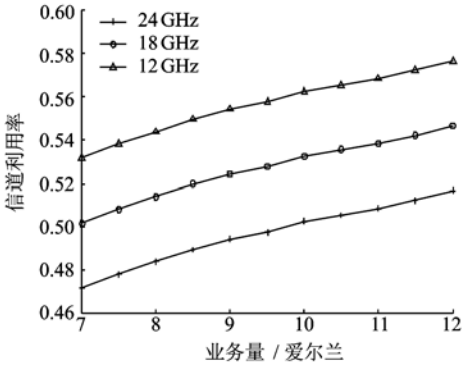

图 8　不同频率的信道利用率

由图 9 和图 10 可以看出,在晴天和恒定业务量的情况下,由于话音和数据业务的分配信道数量不随信道占用时间的影响,因此新呼叫阻塞率和切换失败率是恒值. 例如,数据业务新呼叫阻塞率恒为 0. 514,话音业务的切换失败率恒为 2. 3 $\times 10^{-6}$,而在雨天的情况下,由于雨衰的原因,造成信噪比动态变化而引起误码率变化,要满足系统对误码率的要求,采用自适应编码,为了满足有用信息的传输量,必须动态增加信道的数量,误码率越高,增加的信道数就越多,而导致了新呼叫阻塞率和切换失败率随误码率的增加而增加. 由于雨衰值是随着业务占用信道的时间的增加而增加[7],因此语音和数据业务平均持续时间越长,雨衰越大[8],增加的信道数量越多,因此新呼叫阻塞率和切换失败率越大.

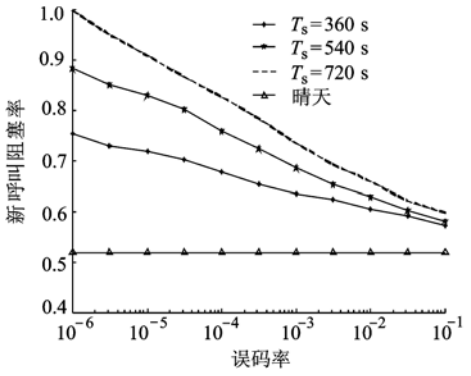

图 9　数据业务新呼叫阻塞率与误码率的关系

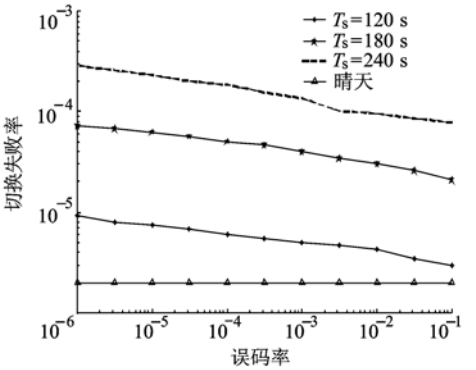

图 10　话音业务切换失败率与误码率的关系

3 结 论

本文提出的降雨情况下的自适应信道分配算法根据不同的降雨情况,采用调整信道带宽补偿比例,动态的为业务分配信道,并采用给话音业务预留信道的方法,保证了语音业务的切换失败率和新呼叫阻塞率. 该算法以新呼叫阻塞率为代价,在保证误码率达到系统要求的同时,又保证了信道中有用信息的传输量,并且满足系统对切换失败率的要求. 本文对该算法进行了详细的理论推导和分析,以铱星系统为背景建立仿真系统,理论分析与仿真结果得到了相互验证. 该算法为低轨卫星系统中多种衰减环境下的信道分配算法研究提供了参考,并且为接下来对雨衰下信道带宽补偿比例的研究奠定了基础.

参考文献(References)

[1] Cakaj S. Rain attenuation impact on performance of satellite ground stations for low earth orbiting (LEO) satellites in Europe [J]. International Journal of Communications, Networks and System Sciences, 2009, 2(6): 480 – 485

[2] Nakazawa S. A method to transform rainfall rate to rain attenuation and its application to 21 GHz band satellite broadcasting [J]. IEICE Transactions on Communications, 2008, E91-B(6): 1806 – 1181

[3] Ronga L S. Resource allocation mechanisms in satellite cooperative systems [C]//5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Cagliari, Italy: IEEE, 2010: 301 – 308

[4] Dong Qijia. Channel management realization in MF-TDMA satellite systems[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(10): 2378 – 2384

[5] Panagopoulos A D, Arapoglou P D M, Cottis P G. Satellite communications at KU, KA, and V bands: propagation impairments and mitigation techniques [J]. IEEE Surv & Tut, 2004, 6(3): 2 – 14

[6] Yu Jia, Zong Peng. The analysis and simulation of communication network in Iridium system based on OPNET[C]//The 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering. Chengdu: IEEE Computer Society, 2010: 68 – 72

[7] Panagopoulos A D. On the rain attenuation dynamics: spatial-temporal analysis of rainfall rate and fade duration statistics [J]. Int J Sat Commun Netw, 2003, 21(6): 595 – 611

[8] Michelson D G. Simulation of rain fading and scintillation on Ka-band earth-LEO satellite links[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Canada: IEEE, 2009: 635 – 640

(编 辑:张 嵘)

(上接第 290 页)

[7] Wagner T, Valasek J. Comparison of computational methods for stability and control analysis[R]. AIAA Paper 2005-140, 2005

[8] Fidanci M, Miller J R, Strauss D J. Integrating automated multidisciplinary optimization in preliminary design of non-traditional aircraft[R]. ADA380252, 2000

[9] Roskam J, Anemaat W A. General aviation aircraft design methodology in a PC environment[R]. AIAA Paper 96-5520, 1996

[10] 刘虎. 飞机概念设计支持理论与原型系统研究[D]. 北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2004
Liu Hu. Research on support theory and prototype system for air-craft conceptual design[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(in Chinese)

[11] Raymer D P. Aircraft design: a conceptual approach[M]. 3rd ed. Reston: AIAA Inc, 1999

[12] 罗明强, 刘虎, 武哲. 开放式飞机总体设计环境的原型研究[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 954 – 959
Luo Mingqiang, Liu Hu, Wu Zhe. Prototype system research on open conceptual aircraft design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 954 – 959(in Chinese)

[13] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册:第 7 册[M]. 北京:航空工业出版社, 2005: 32 – 40
Editorial Board of Aircraft Design Manual. Aircraft design manual: book 7[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005: 32 – 40 (in Chinese)

[14] GJB4856—2003 中国男性飞行员人体尺寸[S]
GJB4856—2003 Body size of Chinese male pilot[S](in Chinese)

(编 辑:李 晶)