

LEO 卫星通信系统覆盖时间和切换次数分析

杨斌^{*①} 何锋^① 靳瑾^② 徐广涵^③

^①(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

^②(清华大学航天航空学院 北京 100084)

^③(北京信威通信技术股份有限公司 北京 100094)

摘要: 针对近地轨道(LEO)卫星移动通信系统,该文提出一种分析不同用户覆盖时间及切换次数的方法。在充分考虑地面用户随机分布特性的基础上,建立了卫星和波束对随机用户的覆盖时间统计模型,推导了星间切换及波束间切换平均次数下限值的计算方法。最后通过铱星通信系统模型(包括铱星星座参数,地面站参数和阵列天线波束模型)对该方法进行了仿真分析,结果显示该方法能很好地近似用户随机覆盖时间统计特性及平均切换次数的下限值。

关键词: 低轨卫星; 多波束天线; 覆盖时间; 切换次数

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)04-0804-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00774

Analysis of Coverage Time and Handoff Number on LEO Satellite Communication Systems

Yang Bin^① He Feng^① Jin Jin^② Xu Guang-han^③

^①(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

^②(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^③(Beijing Xinwei Telecom Technology Incorporation, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper presents an approach for analysis of coverage time and handoff number on the mobile LEO satellite communication systems, which fully reflects the random distribution characteristics of the users. Based on the distribution of the user locations, the statistical models of coverage time on satellites and beams are proposed, and the lower bound calculations of the expected number on inter-beam handoff and inter-satellite handoff are derived. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithms, based on the Iridium communication systems model including the parameters of constellation and earth station, the model of the multi-beam array antennas.

Key words: Low Earth Orbit (LEO) satellites; Multi-beam array antennas; Coverage time; Handoff number

1 引言

目前,包括铱星和全球星在内的大多通信系统卫星都采用三轴姿态稳定和多波束阵列天线技术来实现星地通信,且都为卫星固定小区系统(SFCS)^[1-3]。在SFCS中,卫星的每个波束相对卫星都是固定不动的,卫星的覆盖区被分成若干细小的波束小区,且每个波束覆盖的小区会随同卫星一起移动^[4,5]。由于LEO卫星相对地面的高速移动,一次通信过程可能经历多次的切换,包括卫星间切换和波束间切换^[6,7]。因此,需要对LEO卫星通信系统中的卫星覆盖时间和波束覆盖时间进行准确的

分析。

在LEO卫星移动通信系统中,地面用户位置相对星座内卫星而言随机分布,因此卫星对其覆盖范围内的不同用户有不同的覆盖时间。文献[8,9]建立了用户对单颗卫星的可视时间模型,分析了星间切换平均次数的下限值。文献[9-11]对通信卫星中的波束间切换进行了分析。但是都没有充分考虑移动用户在卫星及波束覆盖范围内位置的随机性。文献[9]在对星间平均切换次数下限值分析时,利用卫星对星下点用户的最大覆盖时间近似卫星对每个用户的覆盖时间。文献[9-11]在对波束间切换分析时,假设波束覆盖内的所有用户最大波束覆盖时间一致。实际中,由于地面接入用户位置的随机性,不同用户相对星下点有不同的位置,因此在同一卫星及波束

2013-05-30 收到, 2013-12-20 改回

国家自然科学基金(61073012)和航空科学基金(201119510)资助课题

*通信作者: 杨斌 yangbin@ee.buaa.edu.cn

覆盖内最大覆盖时间与用户位置有关。

本文针对 LEO 卫星通信系统,充分考虑地面用户终端位置的随机分布特性,提出了分析单颗卫星及单个波束的覆盖时间统计性模型。并在此基础上,推导了计算卫星间切换和波束间切换平均次数下限值的方法。

2 LEO 卫星覆盖时间模型

2.1 单颗卫星覆盖时间模型

根据无线电直线传播的特性,LEO 通信卫星只能在一定时间或角度范围内才能传输和接收地面信息,图 1 为 LEO 卫星对地面用户的覆盖示意图。

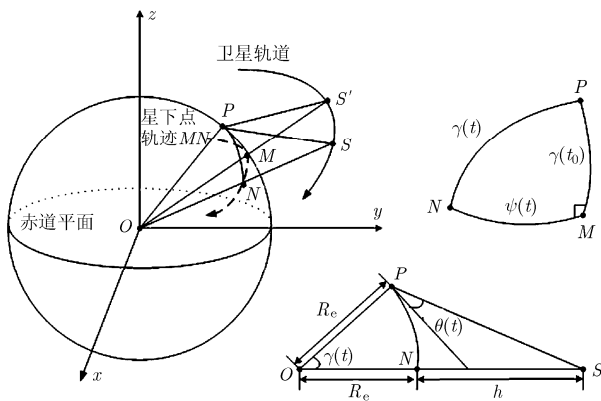


图 1 地面终端与卫星几何关系图

由于地面用户移动速度相对卫星速度很小,可假设地面用户相对地球不动^[12]。图 1 中, O 为地心; P 为地面终端; t_0 时刻对应地面最大仰角 θ_{\max} ; S' 与 M 分别为 t_0 时刻卫星的位置与卫星星下点; S 与 N 分别为 t 时刻卫星的位置与卫星星下点; $\gamma(t_0), \gamma(t)$ 与 $\psi(t)$ 分别为 P 到 M 对应的地心角, P 到 N 对应的地心角与 M 到 N 对应的地心角; R_e 与 h 分别为地球半径与轨道高度。另外, $\theta(t)$ 为 t 时刻地面终端仰角; θ_{\min} 为地面最小仰角, 对应终端到星下点的最大地心角 γ_{\max} 。

根据直角球面三角形 PMN 及三角形 OPS 分别得

$$\cos \gamma(t) = \cos \psi(t) \cos \gamma(t_0) \quad (1)$$

$$\gamma(t) = \arccos \left[\frac{R_e}{R_e + h} \cos \theta(t) \right] - \theta(t) \quad (2)$$

则卫星对终端的覆盖时间 t_c 为

$$t_c = \frac{2}{\omega} \psi(t) = \frac{2}{\omega} \arccos \left[\frac{\cos \gamma_{\max}}{\cos \gamma(t_0)} \right] \quad (3)$$

其中 $\omega = \omega_s - \omega_e \cos i_0$, 为地心地固坐标系(ECF)下的卫星角速度, ω_s 为地心惯性坐标系(ECI)下卫星角速度, ω_e 为 ECI 下地球自转角速度, i_0 为轨道面

倾角。

地面终端在地面随机分布, 假设到星下点的距离服从均匀分布, 因此在卫星对地面终端覆盖时, $\gamma(t_0)$ 满足 $U(0 \sim \gamma_{\max})$ 均匀分布。则 $\gamma(t_0)$ 的概率密度函数 $f_{\gamma(t_0)}(\gamma(t_0))$ 为

$$f_{\gamma(t_0)}(\gamma(t_0)) = \begin{cases} 1/\gamma_{\max}, & 0 \leq \gamma(t_0) < \gamma_{\max} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4), 得覆盖时间 t_c 的累积分布函数为

$$\begin{aligned} F_{T_c}(t_c) &= P \left(\frac{2}{\omega} \arccos \left(\frac{\cos \gamma_{\max}}{\cos \gamma(t_0)} \right) \leq t_c \right) \\ &= 1 - \frac{1}{\gamma_{\max}} \arccos \left(\cos \gamma_{\max} / \cos \frac{\omega t_c}{2} \right), \\ &0 < t_c \leq T_m \end{aligned} \quad (5)$$

其中 T_m 为卫星对终端(在星下点轨迹中)的最大覆盖时间, 对应 $\gamma(t_0)=0$ 。则根据式(3)得

$$T_m = \max(t_c) = 2\gamma_{\max}/\omega \quad (6)$$

根据式(5)得覆盖时间 t_c 的概率密度函数为

$$\begin{aligned} f_{t_c}(t_c) &= \begin{cases} \frac{\omega \cos \gamma_{\max} \tan(\omega t_c/2)}{2\gamma_{\max} \sqrt{\cos^2(\omega t_c/2) - \cos^2 \gamma_{\max}}}, & 0 < t_c \leq \frac{2\gamma_{\max}}{\omega} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(7)可求出卫星对地面终端的平均覆盖时间 $E(t_c)$ 为

$$E(t_c) = \frac{2 \cos \gamma_{\max}}{\omega \gamma_{\max}} \int_0^{\gamma_{\max}} \frac{\varphi \tan \varphi}{\sqrt{\cos^2 \varphi - \cos^2 \gamma_{\max}}} d\varphi \quad (8)$$

2.2 单颗波束覆盖时间模型

低轨卫星通信系统中, 无论是卫星移动终端要求的切换, 还是关口站或是系统控制中心要求的切换, 切换都发生在不同的波束之间^[6,7]。因此对 LEO 卫星通信系统的切换进行分析时, 需要对波束的覆盖时间进行准确的分析。

根据文献[2,3]和文献[5,13]可知, LEO 卫星覆盖通过不同的波束覆盖来实现, 不同波束为不同的小区, 单波束覆盖近似为圆。根据 2.1 节的分析, 用户在单波束覆盖范围内同样满足均匀分布, 因此根据式(7)和式(8)的推导原理, 同理可推出单波束覆盖 t_b 的累积分布函数与平均覆盖时间 $E(t_b)$ 分别为式(9)和式(10)。

$$\begin{aligned} F_{T_b}(t_b) &= 1 - \frac{1}{\gamma_{b \max}} \arccos \left(\cos \gamma_{b \max} / \cos \frac{\omega t_b}{2} \right), \\ &0 < t_b \leq \frac{2\gamma_{b \max}}{\omega} \end{aligned} \quad (9)$$

$$E(t_b) = \frac{2 \cos \gamma_{b \max}}{\omega \gamma_{b \max}} \int_0^{\gamma_{b \max}} \frac{\varphi \tan \varphi}{\sqrt{\cos^2 \varphi - \cos^2 \gamma_{b \max}}} d\varphi \quad (10)$$

其中 $\gamma_{b \max}$ 为单波束覆盖最大地心角的一半。

3 LEO 卫星切换次数下边界分析

实际系统中, LEO 卫星通信系统的不同切换策略有着不同的切换次数^[7,14]。对于任何切换策略, 切换次数都受限于地面终端位置, 卫星覆盖大小及波束覆盖大小, 相邻卫星覆盖或波束覆盖的重叠区域大小等条件^[14,15]。第2节在充分考虑地面终端位置特性的基础上, 对 LEO 卫星覆盖及波束覆盖做了详细的分析。由于星座特点及卫星天线阵覆盖特性等因素, 不同的 LEO 通信卫星具有不同的重叠覆盖区域特性^[2,3]。由于轨道位置的原因, LEO 通信系统在不同时刻也有着不同的重叠覆盖特性^[6]。本文假设星间切换和波束间切换分别发生在用户到达源点卫星边界和源点波束边界时, 并在充分考虑地面终端位置分布特性的基础上, 对切换次数的下边界进行了分析。

用户的呼叫持续时间 t_{ca} , 服从均值为 $1/\mu$ 的负指数分布^[16], 则其概率密度函数为

$$f_{t_{ca}}(t_{ca}) = \mu e^{-t_{ca}\mu} \quad (11)$$

定义 t_{mcl} 为从某个移动终端在其源点卫星发起新呼叫时开始到该用户到达星间切换区域边界时的这一时间间隔。一个未阻塞的原始呼叫可能在当前卫星覆盖内结束通话, 也可能需要星间切换来继续维持通信, 因此原始呼叫由于跨卫星而请求切换的概率 P_{hl} 为^[4,9]

$$P_{hl} = P\{t_{ca} > t_{mcl}\} = \int_0^\infty P\{t_{ca} > t \mid t_{mcl} = t\} \cdot f_{t_{mcl}}(t) dt \quad (12)$$

根据本文第2节的分析, LEO 卫星对随机接入的不同用户的最大覆盖时间 t_c 不是常值 T_m , 其跟地面用户的位置有关。因此可以假设 t_{mcl} 是一个服从 $U(0 \sim t_c)$ 的均匀分布的随机变量, 则其条件概率密度函数为

$$f_{t_{mcl}|t_c}(t_{mcl} \mid t_c) = 1/t_c \quad (13)$$

根据贝叶斯定理, t_{mcl} 的概率密度为

$$f_{t_{mcl}}(t_{mcl}) = \int_0^\infty f_{t_{mcl}|t_c}(t_{mcl} \mid t_c) f_{t_c}(t_c) dt_c = \int_{t_{mcl}}^{T_m} f_{t_c}(t) / t dt, \quad 0 \leq t_{mcl} \leq T_m \quad (14)$$

将式(11)和式(14)代入式(12), 得原始呼叫由于跨卫星而请求切换的概率 P_{hl} 为

$$P_{hl} = \int_0^{T_m} e^{-t\mu} \cdot \int_t^{T_m} f_{t_c}(t_1) / t_1 dt_1 dt \quad (15)$$

定义 $t_{mc}^{(k)}$ 表示正在进行通话的用户相继发生第 $k-1$ 次星间切换到发生第 k 次星间切换的时间间隔, $k \geq 2$, 且 $t_{mc}^{(2)}, t_{mc}^{(3)}, \dots$ 相互独立同分布^[9]。当某呼叫在经历一次成功星间切换后, 该呼叫剩余持续时

间同样服从均值为 $1/\mu$ 的负指数分布^[4,8,10]。假设不同卫星覆盖范围大小一致, 则该呼叫再次发生星间切换的概率为

$$P_h^{(2)} = P_h^{(3)} = \dots = P_h^{(k)} = P_{hk} = P\{t_{rca} > t_{mc}^{(k)}\} = \int_0^\infty P\{t_{rca} > t \mid t_{mc}^{(k)} = t\} \cdot f_{t_c}(t) dt \quad (16)$$

将式(11)代入式(16)得

$$P_{hk} = \int_0^{T_m} e^{-t\mu} \cdot f_{t_c}(t) dt \quad (17)$$

如果不考虑地面用户的分布特性, t_{mcl} 是一个服从 0 到最大覆盖时间 T_m 的均匀分布, 且 $t_{mc}^{(k)} = T_m$ ^[4,9]。则原始呼叫由于跨卫星而请求切换的概率 \hat{P}_{hl} 与原始呼叫再次发生星间切换的概率 \hat{P}_{hk} 分别为

$$\hat{P}_{hl} = (1 - e^{-T_m\mu}) / (T_m\mu) \quad (18)$$

$$\hat{P}_{hk} = e^{-T_m\mu} \quad (19)$$

定义 H_i 为某个呼叫一直持续到发生了至少 i 次 ($i = 1, 2, \dots$) 星间切换的概率^[9]为

$$H_i = P_{hl}(P_{hk})^{i-1} \quad (20)$$

当新呼叫阻塞率与切换失败概率都为 0 时, 某个新到达的呼叫接入系统后, 在整个通话持续期内成功发生星间切换次数 i 的均值为

$$E(i) = \sum_{i=1}^{\infty} \{i H_i\} \geq P_{hl} / (1 - P_{hk}) \quad (21)$$

在考虑地面用户接入位置的分布特性时, 根据式(15)和式(17)得平均星间切换次数的下界为

$$E(i) \geq \frac{\int_0^{T_m} e^{-t\mu} \cdot \int_t^{T_m} f_{t_c}(t_1) / t_1 dt_1 dt}{1 - \int_0^{T_m} e^{-t\mu} \cdot f_{t_c}(t) dt} \quad (22)$$

不考虑地面用户的随机分布特性时, 将式(18)和式(19)代入式(21)得平均星间切换次数的下界为

$$\hat{E}(i) \geq \frac{1 - e^{-T_m\mu}}{T_m\mu(1 - e^{-T_m\mu})} = \frac{1}{\mu T_m} \quad (23)$$

假定波束覆盖为圆形覆盖, 且覆盖面积相等。根据星间切换次数推导原理, 同理可得波束间切换次数的下限值, 在考虑地面用户随机的位置特性时和不考虑地面用户随机位置特性时分别为式(24)和式(25)

$$E(j) \geq \frac{\int_0^{T_{bm}} e^{-t\mu} \cdot \int_t^{T_{bm}} f_{t_b}(t_1) / t_1 dt_1 dt}{1 - \int_0^{T_{bm}} e^{-t\mu} \cdot f_{t_b}(t) dt} \quad (24)$$

$$\hat{E}(j) \geq 1/(\mu T_{bm}) \quad (25)$$

4 仿真分析

4.1 单星覆盖时间仿真

根据文献[2,6]中铱星通信系统的星座参数和地面站参数,设置铱星覆盖仿真的边界条件: $h = 780 \text{ km}$, $\theta_{\min} = 8.2^\circ$ ($\gamma_{\max} = 19.9^\circ$), $i = 86.4^\circ$ 。随机选取 50 个地面站,通过 Satellite Tool Kit(STK)软件对铱星与波束的覆盖时间进行统计分析。

铱星覆盖的 100000 个可视时间段的统计结果与式(5)的分析结果比较如图 2 所示。并且该 100000 个样本的平均覆盖时间为 528 ms,根据式(6)得最大覆盖时间 $T_m = 670 \text{ ms}$,根据式(8)得平均覆盖时间 $E(t_c) = 527 \text{ ms}$ 。从图 2 可以看出,由于充分考虑了地面终端位置的随机分布特性,因此本文的 LEO 卫星覆盖时间累积分布函数式(5)能很好地反映 LEO 卫星覆盖时间的分布特性。并且,在式(5)基础上推导的平均覆盖时间式(8),比最大覆盖时间 T_m 能更好地近似 LEO 卫星覆盖时间特性。

根据式(6)和式(8),图 3 和图 4 分析了不同卫星轨道高度与不同地面最小仰角下的卫星覆盖时间变化情况。图 3 设轨道倾角 $i_0 = 60^\circ$,最小仰角 $\theta_{\min} = 10^\circ$ 。图 4 设轨道倾角 $i_0 = 60^\circ$,轨道高度 $h = 780 \text{ km}$ 。从图 3 中可得出,平均覆盖时间与最大覆盖时间的差值随着轨道高度的增加而增加;从图 4 中可得出,平均覆盖时间与最大覆盖时间的差值随着仰角减小而增加。由于轨道越高卫星覆盖时间越大,而仰角越小卫星覆盖时间越大,因此用卫星最大覆盖时间近似卫星的平均覆盖时间的误差,随着覆盖时间的增加而变大。图 3 和图 4 说明,在考虑地面用户位置的随机分布特性时,式(8)能对卫星的覆盖时间进行更好地估计,特别是在轨道比较高和仰角比较小的情况下。

4.2 星间切换仿真

铱星通信系统的星座参数和地面站参数选取同 4.1 节。在对铱星系统的平均星间切换次数下限值仿真前,先对新呼叫到进行首次切换的时间间隔 t_{mc1} 的分布特性进行仿真分析。对 10,000 个时间接入点的数据进行统计分析,分析结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在对 t_{mc1} 进行分析时,式(13)由于充分考虑了覆盖时间的分布特性,因而比直接利用最大覆盖时间 T_m 能更好地反映首次星间切换时间间隔 t_{mc1} 的分布特性。

铱星星座内的不同卫星在赤道附近的重叠区域最小,在高纬度地区需要关闭部分重叠覆盖的波束^[5]。因此,该仿真假设铱星系统在纬度 -10° 到 10° 范围的覆盖内不需要关闭波束,并在此覆盖范围内随机选取 50 个地面用户,按照图 6(其中一个用户切

换时刻仿真)所示对平均星间切换次数进行统计分析。星间切换次数仿真结果如图 7 所示。

从图 7 中能看出,在分析地面用户切换次数时,考虑地面接入用户分布特性比不考虑地面用户分布特性更接近实际的切换次数。由于平均切换次数的下限值式(21)的近似性,随着呼叫时间的增加(即切换次数的增加),式(21)与实际的切换次数误差会越来越大。从图 7 中,同样得出一致的结论。

4.3 波束覆盖时间仿真及波束切换仿真

铱星通信系统的星座参数和地面站参数设置同 4.1 节一致。根据文献[2]中铱星阵列天线 48 个波束的特征,用 STK 仿真铱星 48 波束覆盖。每个波束近似为圆,设置波束仿真的边界条件:波束共 4 层;第 1 层 3 个, $\gamma_{b\max} = 1.38^\circ$;第 2 层 9 个, $\gamma_{b\max} = 1.98^\circ$;第 3 层 15 个, $\gamma_{b\max} = 2.95^\circ$;第 4 层 21 个, $\gamma_{b\max} = 6.51^\circ$ 。大小不同的波束覆盖时间仿真结果如图 8 所示。

从图 8 中可以得出与图 2 同样的结论,即在对波束进行覆盖分析时,考虑地面用户位置的分布特性比认为波束内的所有用户覆盖时间相等更能反映波束覆盖的特性。

从图 8 的仿真中可以看出铱星 48 个波束的覆盖时间相差不大,因此本文在利用式(24)和式(25)对铱星波束切换次数进行分析时,假定所有波束覆盖相等。因而根据文献[6]中铱星系统 2150 个波束全球覆盖特性,可得出单波束覆盖最大地心角的一半 $\gamma_{b\max} = 2.47^\circ$ 。进而根据式(6)原理,得出铱星波束的平均最大覆盖时间为 $T_{bm} = 83 \text{ ms}$ 。利用式(24)和式(25)对波束间的平均切换次数进行计算。根据前面 STK 仿真的 48 个不同大小波束的覆盖仿真,统计分析波束间平均切换次数。计算结果与 STK 仿真比较结果如图 9 所示。

针对铱星波束覆盖的特点,从图 9 中可以看出,在对铱星波束进行切换仿真时,所有波束覆盖大小相等的假设能较好地近似铱星波束的覆盖特性。并在此基础上,图 9 中能得出与星间波束切换仿真图 7 同样的结论,即在分析波束切换次数时,考虑地面终端位置的随机分布特性比认为波束内的所有终端覆盖时间一致能更好地接近实际的切换次数。特别是在呼叫时间较长时,充分考虑终端位置特性比不考虑终端位置特性,得出的切换次数更接近实际值。

5 结论

本文在充分考虑地面终端位置特性的基础上,建立了分析卫星覆盖及波束覆盖模型,并在此基础

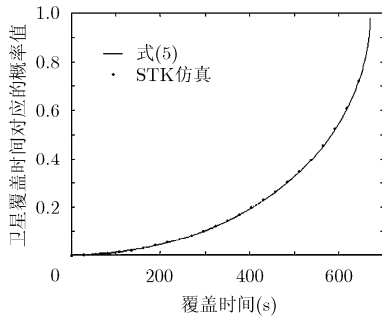


图2 单颗铱星覆盖时间概率情况分析

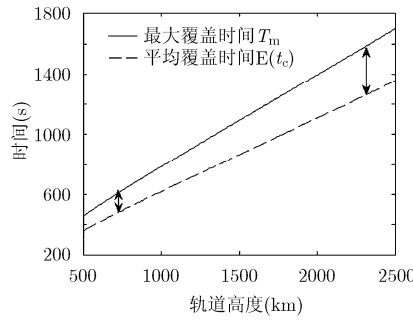


图3 不同轨道高度, 卫星最大覆盖时间和平均覆盖时间比较

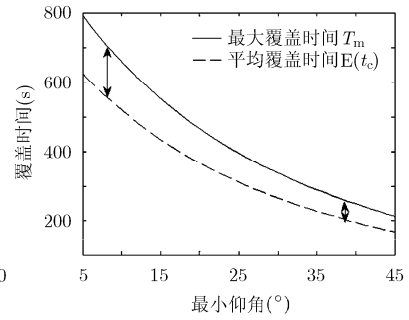


图4 不同仰角, 卫星最大覆盖时间和平均覆盖时间比较

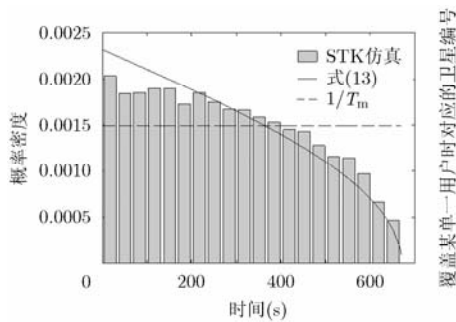


图5 首次星间切换时间间隔 t_{mc1} 的分布特性分析

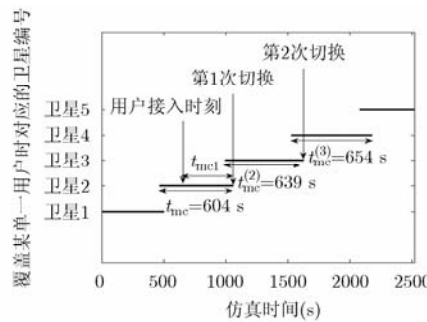


图6 单个用户切换仿真

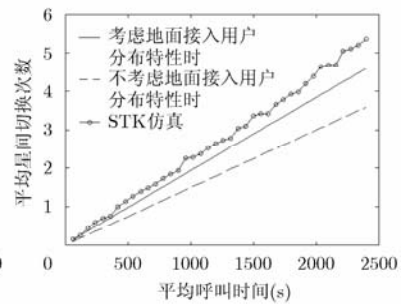
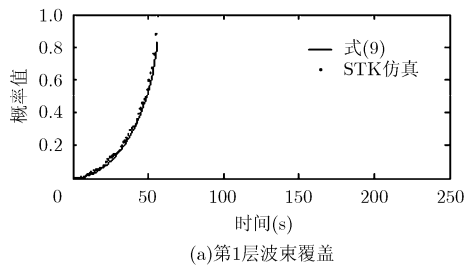
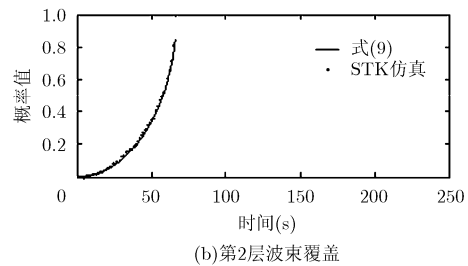


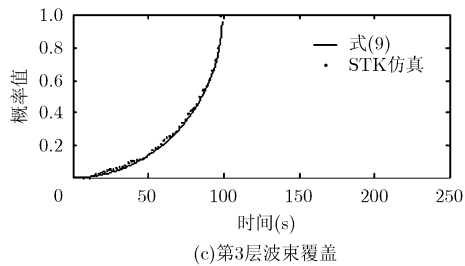
图7 地面用户星间切换次数仿真



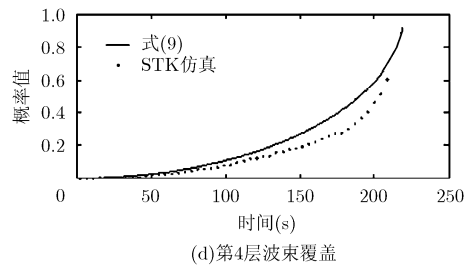
(a)第1层波束覆盖



(b)第2层波束覆盖



(c)第3层波束覆盖



(d)第4层波束覆盖

图8 大小不同的波束覆盖时间结果

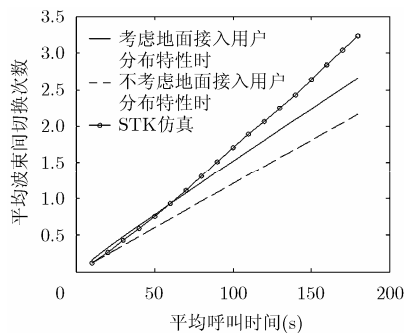


图9 平均波束切换次数仿真结果

上推导了分析星间切换平均次数和波束切换平均次数的计算方法。根据铱星座参数、地面站参数和阵列天线波束特性, 对卫星覆盖时间、波束覆盖时间、首次星间切换时间间隔、星间平均切换次数和波束间平均切换次数进行了仿真。仿真结果显示, 在分析卫星覆盖时间和切换次数平均次数时, 考虑地面终端位置分布的特性比认为所有终端覆盖时间相等更接近真实值。本文建立的分析覆盖时间模型和计算切换次数平均值模型能较好地分析卫星及波

束覆盖, 为设计 LEO 移动通信卫星系统和分析系统覆盖及切换提供了一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Garrison T, Ince M, Pizzicardi J, *et al.* Systems engineering trades for IRIDIUM constellation[J]. *AIAA Journal of Spacecraft and Rockets*, 1997, 34(5): 675-680.
- [2] Schuss J J, Upton J, Myers B, *et al.* The IRIDIUM main mission antenna concept[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1999, 47(3): 416-424.
- [3] Song Hai-wei, Liang Guang, Gong Wen-bin, *et al.* Performance analysis of a seven-beam CDMA-based LEO satellite system[C]. 2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, Singapore, 2012: 155-156.
- [4] Maral G, Restrepo J, Enrico R, *et al.* Performance analysis for a guaranteed handover service in an LEO constellation with a "satellite-fixed cell" system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1998, 47(4): 1200-1214.
- [5] 赵星惟, 吕源, 刘会杰, 等. LEO 通信卫星多波束天线构型方案设计[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(5): 636-641.
Zhao Xing-wei, Lü Yuan, Liu Hui-jie, *et al.* Design on configurations of multi-beam antenna of LEO communication satellite[J]. *Journal of Graduate University of Chinese Academy and Sciences*, 2011, 28(5): 636-641.
- [6] Hubber Y C and Sanders L M. A comparison of the Iridium and Amps systems[J]. *IEEE Network*, 1997, 11(2): 52-59.
- [7] Chatterjee S, Saha J, Banerjee S, *et al.* Neighbour location based channel reservation scheme for LEO satellite communication[C]. 2012 International Conference on Communications, Devices and Intelligent Systems (CODIS), Kolkata, 2012: 73-76.
- [8] Jiang Wen-juan and Zong Peng. An improved connection-oriented routing in LEO satellite networks[C]. 2010 WASE International Conference on Information Engineering, Beidaihe, 2010: 296-299.
- [9] Yu Jia and Zong Peng. Channel reservation and queuing in low earth orbit mobile satellite system[C]. 2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, Moscow, 2010: 734-738.
- [10] Chowdhury P K, Atiquzzaman M, Ivancic W, *et al.* Handover schemes in satellite networks: state-of-the-art and future research directions[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2006, 8(4): 2-14.
- [11] Chen Li-ming, Guo Qing, and Wang Huai-yi. A handover management scheme based on adaptive probabilistic resource reservation for multimedia LEO satellite networks[C]. 2010 WASE international Conference on Information Engineering, Beidaihe, 2010: 255-259.
- [12] 陈立明, 郭庆, 杨明川. 多业务 LEO 卫星网络中基于概率的带宽预留策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 84-89.
Chen Li-ming, Guo Qing, and Yang Ming-chuan. Probability-based bandwidth reservation strategy for LEO satellite networks with multi-class traffic[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(6): 84-89.
- [13] Minatti G, Maci S, Vita D, *et al.* A metasurface isoflux antenna and potential beam reconfigurability[C]. 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Prague, 2012: 2613-2617.
- [14] 李庆, 朱立东, 吴诗其. 低轨卫星系统中的一种带优先级的信道预留策略[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1820-1823.
Li Qing, Zhu Li-dong, and Wu Shi-qi. A channel reservation algorithm with priorities in LEO satellite systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1820-1823.
- [15] Vieira F, Lucani D E, and Alagha N. Load-aware soft-handovers for multibeam satellites: a network coding perspective[C]. 2012 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), Baiona, 2012: 189-196.
- [16] Li Shu-feng, David G, Liu Yan-chen, *et al.* Overlap area assisted call admission control scheme for communications system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(4): 2911-2920.

杨 斌: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为 LEO 卫星通讯、阵列信号处理。

何 锋: 男, 1980 年生, 讲师, 研究方向为实时系统、实时通信。

靳 瑾: 男, 1985 年生, 助理研究员, 研究方向为航天器动力学与控制。

徐广涵: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能天线系统与移动通信系统。