geostationary orbit satellite network. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, 25(4): 280—285

非静止轨道卫星网络同频干扰的分析与仿真*

李　睿　赵洪利　曾德贤

(装备指挥技术学院　北京 101416)

摘　要　由于非静止轨道卫星系统的增加，引起卫星网络间下行数传的同频干扰问题. 针对非静止轨道卫星网络具有时变性的特点，给出了计算非静止轨道卫星网络同频干扰的思路和方法. 对同频干扰进行了仿真，并分析了仿真结果，在此基础上实现了干扰过程的可视化，动态地描述出了仿真时段内不同时刻干扰链路的变化情况.

关键词　非静止轨道；同频干扰；载干比；仿真

中图法分类号　TN927

The Analysis and Simulation of Co-Frequency Interference in Non-Geostationary Orbit Satellite Network

LI Rui　ZHAO Hongli　ZENG Dexian

(*The Academy of Equipment Command and Technology, Beijing* 101416)

Abstract　With the increasing of non-geostationary orbit satellite systems, the frequency bands allocated to the non-geostationary orbit satellite are getting less, which would bring the co-frequency interference for data transmission in down-link of non-geostationary orbit satellite network. The ratio C/I between the useful received carrier power and the overall contribution at the receiver input of interference power can show the interference situation. This ratio depends on the system characteristics, such as type of orbits, number of satellites in the constellation, antenna radiation patterns, etc. This paper analyses the problem of co-frequency interference, according to the time-varied character of non-geostationary orbit satellite the paper introduces a method to calculate co-frequency interference. The co-frequency interference is simulated and the results is analyzed, then, visualization of the interfering course is realized which can dynamically display the changes of interference-link during the different simulation periods.

Key words　Non-geostationary orbit, Co-frequency interference, C/I, Simulation

* 国家高技术发展计划项目资助

2004-11-20 收到原稿，2005-05-10 收到修定稿

1 引言

随着卫星移动通信的发展，出现了越来越多的非静止轨道卫星系统，例如 GlobalStar，Teledesic 等. 非静止轨道卫星系统的出现，标志着卫星通信的又一个飞跃，但也带来了新的问题和挑战，同频干扰问题就是其中之一. 由于非静止轨道卫星与地面站之间的距离远小于同步轨道卫星与地面站之间的距离，并要求直接与地面终端通信 [1]，因此随着使用同频段进行下行数传的非静止轨道卫星增加，使用相同频率、轨道邻近的卫星网络间如果没有采取针对性措施，下行链路之间往往具有严重的干扰. 这使得非静止轨道卫星星座之间，以及它们与静止轨道卫星之间的同频干扰问题变得日益尖锐.

静止轨道卫星相对于固定地面接收站的位置是相对不变的，因此干扰的计算比较简单 [3]，而非静止轨道卫星系统与地面站之间的相对位置却是变化的，从而导致了卫星之间，以及卫星与地面站之间的空间几何关系的时变性，这就增加了干扰计算的复杂程度. 本文分析了非静止轨道卫星网络下行链路同频干扰问题，对非静止轨道卫星网络的 C/I 进行了计算，并实现了干扰的可视化.

2 C/I 的计算方法

C/I 是载波功率 (需要信号) 与干扰功率 (非需要信号) 的比值，用以衡量接收环境与接收机质量，C/I 值越大，说明载波信号相对于干扰越强，接收质量越好. 在卫星通信系统中，C/I 与卫星轨道的类型，星座中卫星的个数，发射及接收天线的种类等参数紧密相关. 计算 C/I 需要知道卫星与地面接收站之间的距离，发射天线在接收天线接收轴线方向上的增益 [3]. 但在非静止轨道卫星网络中，由于卫星与地面站之间的相对位置是时变的，上述参数也会随之变化，从而造成了 C/I 明显的时变性.

因此，在对 C/I 进行计算时，首先要将时间离散化，在每个时间采样点上可认为干扰链路是固定的 [4]，根据一定的初始参数计算出该采样点上卫星与地面站之间的相对几何关系，判断是否满足干扰发生的条件，然后再将每颗干扰卫星的干扰信号折算成进入地面站天线的噪声功率，综合整个星座中所有卫星产生的干扰噪声，就可以得到地面站该采样点上的瞬时干扰功率的总和以及该时刻的 C/I，最后对其进行时间统计，就得到了整个仿真时间内的干扰情况. 在计算中必须注意：所选取的采样间隔必须足够小，以便能够显示出总干扰的快速跳变.

2.1 预推卫星轨道

要得到任一时刻卫星与地面站之间的相对几何关系，首先要进行卫星轨道推算，这样在每一个采样点上就能得到固定地面站所能看到的卫星的数据，包括与地面站的距离、卫星的仰角、方位角等.

设卫星在初始历元时刻 t_0 对应的 J2000 坐标系中状态为 $(x_0, y_0, z_0, v_{x0}, v_{y0}, v_{z0})$，则卫星在时刻 t 对应的 J2000 坐标系中状态可以通过积分卫星轨道获得. 由于可见性分析中不需要特别精确的轨道，因此动力学模型中可以只考虑地球 J_2 摄动和大气摄动的影响.

卫星的动力学方程为

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{v}, \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{g} + \boldsymbol{a}_\mathrm{n} + \boldsymbol{a}_\mathrm{d}. \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{r}$ 为卫星位置矢量，在 J2000 坐标系下的分量为 x, y, z；$\boldsymbol{v}$ 为卫星速度，在 J2000 坐标系下的分量为 v_x, v_y, v_z；$\boldsymbol{g}$ 为不考虑地球非球形因素的引力加速度，$\boldsymbol{g} = -\dfrac{\mu_\mathrm{e}}{r^3}\boldsymbol{r}$，$\mu_\mathrm{e}$ 为地球引力常数；$\boldsymbol{a}_\mathrm{n}$ 为仅考虑 J_2 项时地球非球形摄动加速度 [5]，

$$\boldsymbol{a}_\mathrm{n} = -\frac{3\mu_\mathrm{e}}{2r^3}J_2\left(\frac{R_\mathrm{e}}{r}\right)^2(1-5\sin^2\phi)\boldsymbol{r} - \frac{3\mu_\mathrm{e}}{r^2}J_2\left(\frac{R_\mathrm{e}}{r}\right)^2\sin\phi\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}, \tag{3}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2}}\right). \tag{4}$$

其中，J_2 为地球引力场二阶带谐项的系数，R_e 为地球赤道平均半径；$\boldsymbol{a}_\mathrm{d}$ 为大气阻力摄动加速度，$\boldsymbol{a}_\mathrm{d} = -\dfrac{1}{2}\dfrac{C_\mathrm{d}S}{m}\rho v_r\boldsymbol{v}_r$；$\boldsymbol{v}_r$ 为卫星相对于大气的速度矢量，$\boldsymbol{v}_r = \boldsymbol{v} - \boldsymbol{\omega}_\mathrm{e}\times\boldsymbol{r}$；$\boldsymbol{\omega}_\mathrm{e}$ 为地球的自转角速度，$\boldsymbol{\omega}_\mathrm{e} = [0 \quad 0 \quad \omega_\mathrm{e}]^\mathrm{T}$；$C_\mathrm{d}$ 为大气阻力系数，ρ 为卫星所在处的大气密度，S/m 为卫星的面质比.

通过对卫星动力学方程的积分，可以获得卫星的状态序列 $\{t_i; x_i, y_i, z_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}\}$. 其中，$x_i$, y_i, z_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} 为 t_i 时刻卫星在 J2000 坐标系中的位置分量和速度分量.

2.2 计算卫星位置矢量在地固系的投影

J2000 坐标系到地固坐标系之间转换矩阵 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{HG}}$ 为

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{HG}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{EP}} \cdot \boldsymbol{A}_{\mathrm{ER}} \cdot \boldsymbol{A}_{\mathrm{NR}} \cdot \boldsymbol{A}_{\mathrm{PR}}. \tag{5}$$

其中, $\boldsymbol{A}_{\mathrm{EP}}, \boldsymbol{A}_{\mathrm{ER}}, \boldsymbol{A}_{\mathrm{NR}}, \boldsymbol{A}_{\mathrm{PR}}$ 分别为岁差、章动、自转和极移矩阵, 对于分析干扰条件这个问题, 不需要复杂的天文常数计算, 可以只取自转矩阵.

自转矩阵为

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{ER}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{\mathrm{g}} & \sin\theta_{\mathrm{g}} & 0 \\ -\sin\theta_{\mathrm{g}} & \cos\theta_{\mathrm{g}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

其中, θ_{g} 为格林威治恒星时.

设卫星在 J2000 坐标系下的位置矢量为 $\boldsymbol{r}$, 可以计算出卫星在地固系中的位置矢量 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}}$ 为

$$\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{HG}} \cdot \boldsymbol{r} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{ER}} \cdot \boldsymbol{r}. \tag{7}$$

同理, 可得地面点在地固系中的位置矢量 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{e}}$, 从而得到卫星和地面站在地固系中的相对位置关系.

2.3 判断卫星对地面站的可见性

由于非静止卫星位置的时变性及地球的遮蔽, 干扰的发生是有条件限制的, 须满足一定的条件.

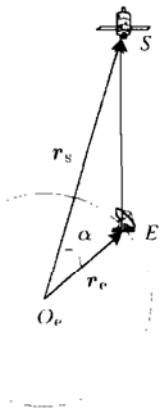

图 1 非静止卫星与地面站之间的几何关系

Fig.1 Geometrical relation between interfering satellite and interfered ground station

在地固坐标系中, 非静止卫星和地面站之间的几何关系如图 1 所示. 其中, S 为非静止卫星, E 为地面站, O_{e} 为地心, $\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}}, \boldsymbol{r}_{\mathrm{e}}$ 分别为卫星和地面站在地固系中的地心矢量, 则 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}}$ 与 $\boldsymbol{r}_{\mathrm{e}}$ 的夹角为

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}} \cdot \boldsymbol{r}_{\mathrm{e}}}{|\boldsymbol{r}_{\mathrm{s}}| \cdot |\boldsymbol{r}_{\mathrm{e}}|}\right). \tag{8}$$

设地球半径为 R_{e}, 干扰卫星高度为 h, 则当

$$\alpha \leqslant \arccos\left(\frac{R_{\mathrm{e}}}{R_{\mathrm{e}} + h}\right) \tag{9}$$

时, 卫星可见地面站. 但考虑到地面环境热噪声所带来的地面损耗, 以及因接收仰角不同所产生的大气传播影响, α 的限制条件将发生改变 [6]. 设最小仰角为 σ, 则 α 需满足条件

$$\alpha \leqslant \arccos\left(\frac{R_{\mathrm{e}} \cos\sigma}{R_{\mathrm{e}} + h}\right) - \sigma, \tag{10}$$

此时, 卫星可能对下行链路造成干扰.

2.4 瞬时 C/I 的计算

由 (10) 式判断出任意仿真时刻有可能构成干扰的非静止轨道卫星后, 就可以计算出地面站在该采样点上瞬时干扰功率的总和, 从而得到该时刻的 C/I. 为了表示方便, 现约定当 $i = 1, 2, \cdots$ 时, 下面参数相应的发射机为干扰信号发射机, 当 $i = 0$ 时, 参数相应的发射机为有用信号发射机.

在某一特定采样点, 地面站接收机接收到来自单颗干扰卫星 i 的干扰功率为 [3]

$$I_i = P_i \cdot G_t(\phi_i) \cdot G_r(\theta_i) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d_i}\right)^2. \tag{11}$$

地面站接收机接收到通信卫星发送的有用信号功率为

$$C = P_0 \cdot G_t(\phi_0) \cdot G_r(\theta_0) \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2. \tag{12}$$

式中, ϕ_i 为发射机轴线方向与地面站接收天线接收方向之间的角度; $G_t(\phi_i)$ 为发射机在角度 ϕ_i 方向上的天线增益; θ_i 为地面站天线的接收轴线方向与发射机的发射方向之间的夹角; $G_r(\theta_i)$ 为接收机在角度 θ_i 方向上的天线增益; d_i 为从干扰卫星到地面站的距离; P_i 为发射机的射频功率; I_i 为地面站接收机接收到的干扰功率; C 为地面站接收机接收到的有用信号功率. 为了计算方便起见, 在此采用振幅均匀分布的矩形同向口径天线, 其增益为 [7]

$$G(\theta) = G_{\max}\left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2}ka\sin\theta\right)}{\frac{1}{2}ka\sin\theta}\right]^2. \tag{13}$$

其中, $G_{\max} = \eta\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$, θ 为地面站天线的接收轴线方向与干扰发射机的发射方向之间的夹角.

设干扰卫星总个数为 n，则受扰地面站接收到的总干扰功率为

$$I=\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2\sum_{i=1}^{n}P_i\cdot G_t(\phi_i)\cdot G_r(\theta_i)/d_i^2. \tag{14}$$

该时刻总的载干比为

$$C/I=10\lg\frac{P_0\cdot G_t(\phi_0)\cdot G_r(\theta_0)/d_0^2}{\sum_{i=1}^{n}P_i\cdot G_t(\phi_i)\cdot G_r(\theta_i)/d_i^2}. \tag{15}$$

考虑到卫星空间几何位置的时变性，C/I 亦成为时间的函数，这个计算必须不停地进行. 如果按照要求的精度选取合适的 Δt，设仿真时间为 t，仿真步长为 Δt，仿真开始时刻为 t_0，$t_i=t_0+\Delta t*i$ $(i=1,2,\cdots,(t-t_0)/\Delta t)$ 为任意采样时间点，在整个时段内对其进行时间统计，就可以得到整个仿真时间内的 C/I 随时间变化的情况.

3 仿真分析与可视化

3.1 仿真场景设定

下面以某一 36 星的非静止轨道卫星星座为例，分析工作在同一频段的非静止轨道卫星网络对静止轨道卫星下行数传的干扰情况. 假设该非静止轨道卫星星座由 6 个倾角为 65° 的固定轨道面组成，每个轨道面均匀分布 6 颗卫星，相邻轨道平面的升交点差为 60°，相邻轨道平面的两颗相邻卫星间的相位差为 10°，卫星固定高度为 5000 km，于是轨道半径为 11 378.137 km，由开普勒第三定律可得轨道周期为 201.31 min，GEO 卫星的经纬度均为 0°，地面站位置坐标为 (0.223°W, 48.739°N)，其天线方位角为 182°，仰角 34.08°. 为了简化起见，假设非静止轨道卫星和静止轨道卫星的天线轴指向地心. 在该仿真中，选取仿真时间为 2 h，取样间隔为 1 min. 表 1 给出了仿真中通信能力的假定.

表 1 通信能力的假定

Table 1 The supposed communication ability

	静止轨道卫星	非静止轨道卫星
下行频率	6.974 GHz	6.975 GHz
调制方式	QPSK	QPSK
传输速率	1.000 Mbps	4.5000 Mbps
天线最大增益	30.000 dB	30.000 dB
功率	40.000 dBW	30.000 dBW

3.2 仿真结果分析

给定各卫星的初始坐标状态 $(x_0,y_0,z_0,v_{x0},v_{y0},v_{z0})$，就可以通过积分获得卫星在 t 时刻对应的卫星轨道，从而得到卫星与地面站之间的相对几何关系，包括接收天线轴与干扰路径间的夹角以及干扰路径长度.

由于非静止轨道卫星位置的时变性，接收天线轴与干扰路径间的夹角，以及干扰路径长度都是随时间不断变化的 [2]. 通过计算可得该实例中给定的非静止轨道卫星的角速度为 1.788°/min. 图 2 以非静止轨道卫星星座中的一颗卫星 Sat-41 为例，给出了地面站接收天线主轴与干扰路径之间的角度随时间变化的情况，从图中可以看出，接收天线主轴与 Sat-41 干扰路径之间的夹角在 1 h 内发生了较大的变化，最小值为 11.133°、最大值为 131.622°.

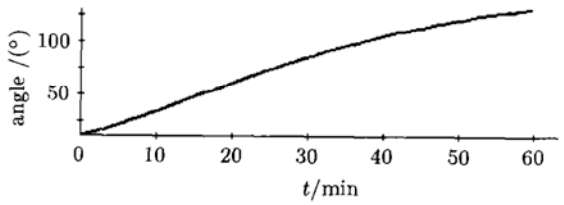

图 2 接收天线主轴与干扰路径间的夹角随时间的变化

Fig.2 The change of angle between receiving antenna's principal axis and the interference path with time

图 3 是 Sat-41 与地面站之间的距离随时间变化的情况，从图中可以看出，Sat-41 与地面站的距离随时间在 5125.474—9447.319 km 之间不断发生改变.

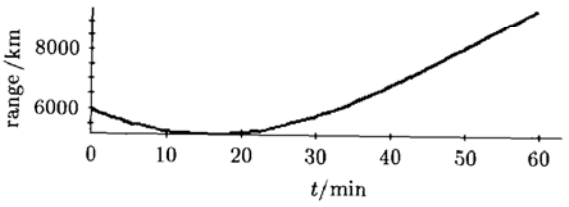

图 3 Sat-41 与地面站间距离随时间的变化

Fig.3 The change of distance between Sat-41 and ground station with time

以上两图很好地说明了非静止轨道卫星与固定地面站的空间几何关系具有明显的时变性的特点.

表 2 给出了在某一时刻非静止轨道卫星星座与地面接收站的空间几何关系及干扰情况. 根据该时刻卫星与地面站之间的相对几何关系及干扰的约束

条件可知，此时共有 7 颗卫星满足对地面接收站的干扰条件，具体参数如表 2 所示. 其中 G_t 为发射机在地面站天线接收方向上的增益，单位为 dB; G_r 为受扰地面站接收天线在卫星发射机方向的增益; ϕ_i 为发射机轴线方向与地面站接收天线接收方向之间的角度，单位为度; θ_i 为地面站天线的接收轴线方向与发射机的发射方向之间的夹角; $EIRP_t$ 为发射机的有效全向辐射功率，单位为 dBW; P_r 为地面站接收天线处的干扰功率，单位为 dBW; d 为相应卫星与地面站之间的距离，单位为 km.

表 2 某一时刻干扰卫星与地面站的几何关系及干扰情况

Table 2 Geometrical relation between interfering satellite and interfered ground station as well as the situation of interference at a time

卫星名称	G_t	G_r	ϕ_i	θ_i	$EIRP_t$	P_r	d
Sat-13	-10.000×10^5	0.000	29.718	92.446	-99.997×10^4	$-1,000,169.750$	6930.052
Sat-22	-10.000×10^5	0.000	33.677	120.164	-99.997×10^4	$-1,000.164.561$	8620.456
Sat-23	27.018	−5.000	15.473	54.305	57.018	−138.432	5369.960
Sat-32	26.791	0.000	17.816	87.969	56.791	−133.871	5502.593
Sat-41	26.095	2.823	23.269	11.145	56.095	−132.415	5944.546
Sat-42	-10.000×10^5	0.000	32.434	117.997	-99.997×10^4	$-1,000,163.682$	7790.206
Sat-51	-10.000×10^5	0.000	33.574	93.368	-99.997×10^4	$-1,000,164.452$	8512.918

从表 2 可以看出，干扰卫星与地面站之间相对位置的不同造成了干扰效果上的差异. 其中，Sat-23、Sat-32、Sat-41 对地面站干扰比较明显. 而对于其余卫星，由于干扰路径远离天线轴线方向且与地面站存在较大距离，因而干扰非常微弱，可以忽略不计.

结合公式 (15)，可以计算出该时刻的 C/I 为 0.1278 dB. 通过选取合适的采样时间和取样间隔，就可得到任一时刻整个非静止轨道卫星星座对下行链路的干扰情况，并将 C/I 的变化曲线直观地表示出来. 如图 4 所示，就是在某天 2 h 内的干扰情况. 该图反映了由于卫星空间位置的细微变化引起的总干扰的跳动，从图中可以看出，由于非静止轨道卫星空间位置变化较快，因而发生干扰的时段较短，具有突变性. 在干扰发生的时刻 C/I 有明显的降低，在干扰最为恶劣的时刻 C/I 降低到 −0.543 dB.

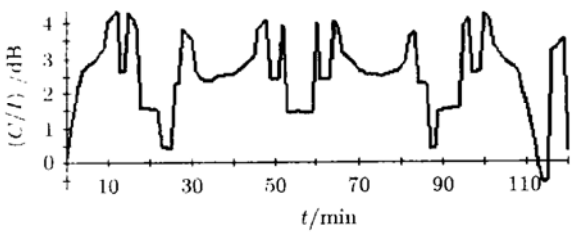

图 4 非静止星座对静止卫星下行数传的干扰

Fig.4 The interference of non-geostationary orbit satellite constellation to down-link data transmission in geostationary orbit satellite

3.2 可视化的实现

由于非静止轨道卫星相对地球的位置是时变的，因此，干扰链路也是随时间不断改变的. 为了能够将干扰链路的变化情况在三维场景中动态、直观地表现出来，利用 STK (Satellite Tool Kit) 仿真软件和 VC++ 编程建立了演示平台. 演示平台的主要功能包括：描述卫星网络的拓扑结构；描述卫星与地面站相对位置的变化情况；描述干扰发生时段内的干扰过程，着重对干扰链路的时变性进行描述，显示各个仿真时刻干扰链路的变化情况.

图 5 为演示平台的工作流程. 其中，STK/ Connect 模块是 STK 软件为第三方应用程序提供的与 STK 的接口，它为用户程序提供了一系列函数，用

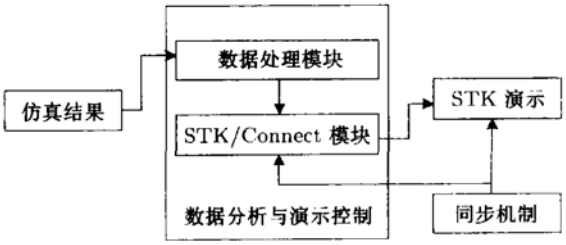

图 5 演示平台的工作流程

Fig.5 The flow chart of demonstration platform

来与 STK 建立连接和发送相应的命令，以控制 STK 内部复杂的操作 *. 为了方便读取仿真结果数据，建立了数据处理模块. 该模块主要负责从仿真结果数据中提取有效信息并构造成 STK/Connect 连接库中给定的命令格式，在建立与 STK 的连接后通过发送给 STK，以推动三维窗口的演示进程.

图 6 就是上述实例中某一时刻通信链路与干扰链路形象的三维显示. 从图中可以看出，在该时刻，共有 5 颗非静止轨道卫星对静止轨道卫星 GEO1 构成干扰，其中实线为静止轨道卫星与地面站间的通信链路，虚线则表示非静止卫星网络对下行数传的干扰链路. 整个演示过程是动态的，随时间的推演显示出仿真时段内不同时刻链路的变化情况，很好地表现出了干扰链路的时变特点. 从运行情况来看，演示画面造型逼真、形象生动，基本达到了可视化的要求.

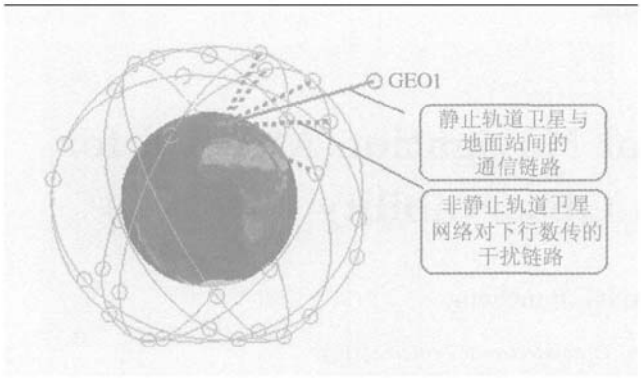

图 6 某一时刻通信链路与干扰链路的演示

Fig.6 The demonstration of communication and interference paths at a time

4 结束语

随着各国卫星应用的发展，使用同频段进行下行数传的非静止轨道卫星越来越多，卫星轨道和资源的有限性与卫星应用的巨大需求之间的矛盾日益突出，在实际中已经造成了损失，因此对非静止轨道卫星网络同频干扰的详细分析显得尤为重要. 本文研究了非静止轨道卫星网络下行链路同频干扰的计算方法，进行了实例的仿真并结合工程数据进行了仿真分析，最后通过建立演示平台实现了干扰的可视化. 这些对研究非静止轨道卫星网络的同频干扰问题和提高抗干扰能力，具有一定的参考价值.

参考文献

[1] Lei Zhenzhou. Mobile Satellite Communication. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 1993. in Chinese (雷震洲. 移动卫星通信. 北京：人民邮电出版社， 1993)

[2] Reed A G. Accommodation of Feeder-Links of Non-geostationary Satellites for Personal Communications in Frequency Bands Allocated to the Fixed-satellite service. In: 5th Intern. Conf. Sat. Sys. Mob. Comm. Nav., 1996, Conf. Pub. **424**:93—96

[3] Cai Jianming, Gan Zhongmin. Satellite Communication System. Beijing: Chinese Posts and Telecommunications Press, 1994. in Chinese (蔡剑铭，甘仲民. 卫星通信系统. 北京：中国邮电出版社， 1994)

[4] Blondeau S. Self Interference in Non-geostationary Satellite Systems. In: 10th Intern. Conf. Dig. Sate. Comm., 1995, **1**:290—297

[5] Yang Weilian. An accurate mathematical model for satellite ephemeris. *Chin. J. Space Sci.*, 1999, **19**(2): 148—153. in Chinese (杨维廉. 一种高精度的卫星星历模型. 空间科学学报， 1999, **19**(2):148—153)

[6] Liu Huijie, Zhang Naitong. Research on constellation visibility for global navigation satellite system. *Sys. Eng. Elec.*, 2000, **22**(5):23—25. in Chinese (刘会杰，张乃通. 全球导航卫星系统的星座可见性研究. 系统工程与电子技术， 2000, **22**(5):23—25)

[7] Xie Chufang, Qiu Wenjie. Theory and Design of Antenna. Xian: Northwest Telecommunication Engineering Institute Press, 1987. in Chinese (谢处方，邱文杰. 天线原理与设计. 西安：西北电讯工程学院出版社， 1987)

* Patrick R C, Marshall S R. STK Connect. Analytical Graphics, INC (AGI), 1998