

## 天线振颤对 GMR-1 系统波束选择的影响分析及抑制

林晓旭<sup>1</sup>, 刘乃金<sup>2</sup>, 钱晋希<sup>1</sup>, 赵旦峰<sup>1\*</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国空间技术研究院 通信卫星事业部, 北京 100094)

(\* 通信作者电子邮箱 zhaodanfeng@hrbeu.edu.cn)

**摘要:**针对卫星天线振颤的现象,分析了天线振颤对地球同步轨道移动无线接口(GMR-1)系统波束选择性能的影响,并提出了一种抑制这种影响的改进型波束选择算法。改进算法根据移动地面站(MES)与其所在波束中的网关(GS)的距离动态设置滞后余量。利用 OPNET 软件搭建系统模型进行仿真验证,结果表明:天线振颤对不同地理位置的 MES 的波束选择过程有不同程度的影响;传统波束选择过程中,波束选择错误次数随滞后余量和天线最大振颤幅度的增加而增加;改进算法能够显著减少波束选择错误次数,有效抑制天线振颤对波束选择性能的影响。

**关键词:**卫星通信;地球同步轨道移动无线接口;波束选择;滞后余量;OPNET

**中图分类号:** TN927.23 **文献标志码:** A

### Analysis and suppression of influence on spotbeam selection of GMR-1 system under antenna oscillation

LIN Xiaoxu<sup>1</sup>, LIU Naijin<sup>2</sup>, QIAN Jinxi<sup>1</sup>, ZHAO Danfeng<sup>1\*</sup>

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Considering the antenna oscillation phenomenon, the performance of spotbeam selection in Geostationary Earth Orbit Mobile Radio Interface (GMR-1) system under antenna oscillation was analyzed and an improved spotbeam selection algorithm was proposed. The improved algorithm could dynamically set hysteresis using the distance between the Mobile Earth Station (MES) and its Gateway Station (GS). A simulation model was implemented using OPNET. The simulation results show that the MES at different location is influenced by antenna oscillation to different extent. Besides, the wrong times of spotbeam selection increases with the increase of hysteresis and the maximum amplitude in the traditional algorithm. Finally, the improved algorithm can reduce the wrong times of spotbeam selection and restrain the influence on spotbeam selection under antenna oscillation efficiently.

**Key words:** satellite communication; Geostationary Earth Orbit Mobile Radio Interface (GMR-1); spotbeam selection; hysteresis; OPNET

## 0 引言

对地球同步轨道移动无线接口(Geostationary Earth Orbit Mobile Radio Interface, GMR-1)系统是根据欧洲电信标准委员会制定的 GMR-1 标准,提供卫星移动通信业务的对地球同步轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星移动通信系统。正常情况下,能够精确完成所有通信过程。但卫星上的大口径网状天线的弹性形变会导致天线振颤,使波束形成性能、天线指向发生变化<sup>[1]</sup>,从而对整个系统的通信性能产生影响。正确地进行波束选择是正常通信的前提,因此,基于 GMR-1 标准<sup>[2-6]</sup>建立仿真模型分析天线振颤对波束选择影响,以及提出改进算法抑制天线振颤对波束选择性能的影响具有重要意义。

在以往文献中,没有具体分析过天线振颤对波束选择性能的影响,更缺乏针对此现象的抑制措施。文献[7-8]中,

作者针对地面通信系统提出了根据移动台的位置信息动态调整滞后余量的切换算法,并进行了仿真研究。文献[9]针对 GEO 卫星移动通信系统中的高速移动的移动台,提出了一种对平均窗口长度和滞后余量取值进行自适应调整的动态切换算法,并对算法性能进行了评估比较。本文借鉴上述研究,建立 GMR-1 系统模型,分析天线振颤对波束选择性能的影响,并对 GMR-1 标准中的传统波束选择算法进行改进,提出了一种可以抑制此现象的动态设置滞后余量的波束选择算法。

## 1 天线振颤规律及对波束选择过程的影响

本章首先介绍多波束天线的设计以及天线的振颤规律;然后,描述了移动地面站(Mobile Earth Station, MES)开机时进行波束选择的过程;接下来,分析天线振颤对波束选择过程的影响以及天线振颤情况下 GMR-1 标准中传统波束选择算法存在的不足。

**收稿日期:** 2013-06-17; **修回日期:** 2013-10-06。 **基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HEUCF130802)。

**作者简介:** 林晓旭(1988-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向:现代通信系统、卫星通信; 刘乃金(1978-),男,山东聊城人,高级工程师,博士,主要研究方向:无线通信、卫星通信; 钱晋希(1986-),男,湖南株洲人,博士,主要研究方向:现代通信系统; 赵旦峰(1961-),男,湖南湘潭人,教授,博士,主要研究方向:现代通信系统、通信信号处理。

### 1.1 多波束天线的设计与振颤规律

在 GMR-1 通信系统中,卫星与用户端之间的天线是多波束的,多波束天线设计的主要工作是生成具有特定辐射特性的若干个波束,通过 OPNET 中的外部模型访问 (External Model Access, EMA) 代码来实现。

天线的辐射特性符合高斯方向图,其增益函数模型<sup>[10]</sup>用式(1)表示:

$$G(\theta) = G(0) \exp\left(-2.77\left(\frac{\theta}{\theta_{1/2}}\right)^2\right) \quad (1)$$

其中: $G(0)$  为最大增益, $\theta$  为与最大增益方向的偏移角, $\theta_{1/2}$  为天线的半功率宽度。

根据式(1)所描述的天线辐射特性模型,参考 GMR-1 标准中的七小区分组,通过在 OPNET 中改变天线指向,生成 7 个波束。波束排列形状如图 1 所示,中间 1 个,四周均匀分布 6 个圆形的点波束。

在设计完成多波束天线的基础上<sup>[11]</sup>,讨论天线的振颤规律并给出振颤情况下天线的增益函数模型。假设:卫星波束天线的振颤是周期性出现的,周期为 210 s;每个周期中天线振颤持续时间为 100 s,天线周期性摆动的周期为 5 s。振颤的幅度指数衰减,衰减规律由式(2)表示。

$$\theta(t) = A \exp(-at) \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (2)$$

式中: $\varphi$  表示初始相位; $f$  表示天线振颤频率; $\theta(t)$  表示振颤导致的角度偏移量。

由以上可得,振颤情况下的波束天线增益函数模型如式(3)所示:

$$G(\theta(t)) = G(0) \exp\left(-2.77\left(\frac{A \exp(-at) \sin(2\pi ft + \varphi)}{\theta_{1/2}}\right)^2\right) \quad (3)$$

天线振颤时方向图指向随时间变化,导致波束覆盖范围随时间发生变化,即使 MES 位置固定,它的接收信号功率、载噪比也随时间变化,最终会影响 MES 进行正确的波束选择,具体的影响会在 1.3 节中进行分析。

### 1.2 波束选择过程

如果 MES 处于图 1 所示的波束覆盖区域内,当 MES 处于空闲模式,如刚开机时,即进行波束选择,只有选择到了正确的波束, MES 才能进行正常的通信。

#### 1.2.1 波束选择

在 GMR-1 标准中<sup>[4,6]</sup>传统波束选择的步骤如下:

1) 广播控制信道 (Broadcast Control Channel, BCCH) 载波搜索:在每个 MES 的存储卡中,预先存储当前 GMR-1 系统所有波束的“所有 BCCH 载波序号列表”,对于任意一个 MES,按照公共陆地移动网络 (Public Land Mobile Network, PLMN) 优先级的顺序,依次扫描所有的 BCCH 载波。

2) 相邻 BCCH 载波搜索:当 MES 扫描至任意 BCCH 载波时,将包含此 BCCH 载波的波束作为中心波束,同时读取该 BCCH 载波系统信息当中的“相邻 BCCH 载波序号列表”,并依次调频至该 6 个 BCCH 载波。

3) 信号强度测定: MES 依次连续测量包含中心波束在内的 7 个波束的 BCCH 载波的信号强度,多次测量取平均值。

数学表达式为:若用  $b_1^j, b_2^j, \dots, b_7^j$  分别表示 7 个波束信号强度的第  $j$  次测量值,其中,  $j$  最大取为 15,则每个波束的平均功率用式(4)表示:

$$m_i = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^j b_i^k \quad (4)$$

4) C1 准则: C1 准则即 BCCH 信号的路径损耗准则,用于保证终端能够建立可靠的信号连接,定义如式(5)所示:

$$C1 = \text{ReceiveLevelAverage} + \text{RXLEV\_SELECT\_MIN} + 114.7 \quad (5)$$

其中: C1 的单位为 dBW;  $\text{ReceiveLevelAverage}$  是 MES 天线端的通量密度,  $\text{RXLEV\_SELECT\_MIN}$  是从 BCCH 系统信息获得的门限参数,在覆盖区域范围内的空旷处,该参数用于设置与通量密度相关的信号强度门限值, MES 会对相邻波束采用候选波束的  $\text{RXLEV\_SELECT\_MIN}$  参数来进行 C1 准则校验。

5) 波束选择:依据 C1 准则进行波束的选择。MES 选定最强的波束以及最强波束相差小于信号差值门限  $\text{SB\_SELECTION\_POWER}$  的所有波束。同时假设所选波束的  $C1 > 0$ 。如果  $\text{SB\_SELECTION\_POWER}$  为 0,那么将会选择最强的点波束。

6) 若 MES 选定的最强波束不是当前波束,且与当前波束相比,信号强度大于滞后余量门限  $\text{SB\_RESELECT\_HYSTERESIS}$ ,则 MES 选择新波束作为服务波束;反之, MES 仍选择当前波束作为服务波束。

#### 1.2.2 波束选择的校验

波束选择之后, MES 从 BCCH 系统信息中获得当前波束与相邻 6 个波束的网关 (Gateway Station, GS) 的经纬度信息,计算 MES 与各个 GS 的距离,与 MES 距离最短的 GS 所在波束校验为选择的波束,如果这个最短距离大于波束半径,或者校验的选择波束不等于通过以上步骤选择的波束,那么判断为波束选择错误,重新进行波束选择。

### 1.3 天线振颤对波束选择的影响

卫星天线振颤时,其天线方向图指向时变,导致波束覆盖范围的时变,从而地球表面各个地理位置的 MES 即使位置固定,其接收信号功率、载噪比也随时间变化。由于波束选择过程是基于 MES 接收信号功率进行的,因此天线振颤会对波束选择过程产生影响,详细分析如下:

如图 2 所示,有两个相邻波束 A 和 B,各波束的 GS 均位于波束中心,实线表示无振颤时的覆盖区域,假设 MES 没有移动,此时 MES 位于波束 A 的覆盖范围内,虚线区域表示天线振颤后的覆盖区域。在天线振颤后,位于波束 A 边缘位置的 MES 处于波束 B 的覆盖范围,若从波束 B 接收的功率与从波束 A 接收的功率相比大于  $\text{SB\_RESELECT\_HYSTERESIS}$ ,按照描述的波束选择过程, MES 选择波束 B 作为驻留的新波束,但是,在波束选择校验过程中, MES 到波束 A 中的 GS 距离还是比 MES 到波束 B 中的 GS 距离短,因此校验波束 A 为应该选择的波束,从而造成波束选择错误。

GMR-1 标准中波束选择算法的滞后余量  $\text{SB\_RESELEC\_HYSTERESIS}$  是静态值。当  $\text{SB\_RESELEC\_HYSTERESIS}$  很小时, MES 很容易从波束 A 切换到波束 B,波束选择错误次数会很多;当  $\text{SB\_RESELEC\_HYSTERESIS}$  很大时,虽然 MES 不容易切换到波束 B,但是一旦切换到波束 B,就很难再切换回来,波束

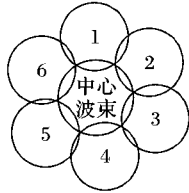


图1 点波束分布

选择错误次数还是很多。因此,传统的波束选择算法并不适用于天线振颤情况下的 GEO 卫星移动通信系统。

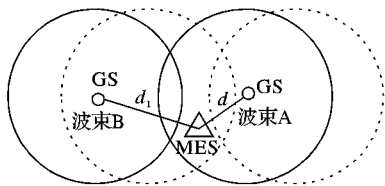


图2 天线振颤时波束覆盖区域变化示意图

## 2 动态设置滞后余量的改进算法

由于传统波束选择算法中的静态滞后余量  $SB\_RESELECT\_HYSTERESIS$  并不适用于天线振颤情况下的 GEO 卫星移动系统,因此提出了动态滞后余量的波束选择算法。该算法借助于 MES 接收的服务 GS 的位置,以及全球定位系统(Global Positioning System, GPS)确定的本身位置,计算 MES 与 GS 的距离。MES 在正确的服务波束 A 中时测得的 MES 与服务波束的 GS 的距离  $d$  小于由于天线振颤导致波束 B 作为服务波束时测得的地面站与服务波束中 GS 的距离  $d_1$ 。

在天线振颤的过程中,波束边缘的 MES 即使没有移动,也会在两个波束间频繁切换。当 MES 切换到一个新的波束,它首先按照 GMR-1 标准执行波束选择过程的前 5 步,执行第 5)步后,当测得有新波束的信号强度最强时,首先要计算 MES 与原波束中 GS 的距离  $d_{old}$  以及它与新波束中 GS 的距离  $d_{new}$ 。然后根据计算的距离设置滞后余量  $SB\_RESELECT\_HYSTERESIS_d$ ,并根据 GMR-1 波束选择过程的第 6)步选择服务的波束。 $SB\_RESELECT\_HYSTERESIS_d$  设置如式(6)所示:

$$SB\_RESELECT\_HYSTERESIS_d = \begin{cases} k_1 d_{new}, & d_{new} > d_{old} \\ k_2 d_{new}, & d_{new} \leq d_{old} \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $k_1$  和  $k_2$  为修正参数。

当距离新波束的 GS 的距离  $d_{new}$  大于距离原波束的 GS 的距离  $d_{old}$  时,说明是由于天线振颤导致 MES 从波束 A 切换到波束 B,此时让滞后余量取一个较大的值,使 MES 选择新波束作为服务波束的概率变小。当 MES 距离新波束的 GS 的距离  $d_{new}$  小于距离原波束的 GS 距离  $d_{old}$  时,说明是从波束 B 切换回波束 A,此时让滞后余量取一个较小的值,使 MES 选择新波束作为服务波束的概率变大。根据以上分析,只要根据 MES 与 GS 的距离改变滞后余量,就可以减少波束选择的错误次数。

## 3 仿真平台设计

为了分析天线振颤对波束选择的影响并验证改进算法的性能,利用 OPNET 软件搭建仿真平台<sup>[12-14]</sup>,参考文献[15],建立 GEO 卫星移动通信网络,网络中包括卫星、GS、MES 三种节点,卫星节点主要用于转发信息,GS 节点主要负责服务区域内所有 MES 的通信,如广播系统信息,MES 基于接收到的系统信息进行波束选择;此外,在卫星节点中建立了多波束天线模型,模拟天线振颤的过程。

利用 OPNET 软件搭建的卫星移动通信系统网络模型仿真场景如图 3 所示,7 个波束的分布如图 1 所示,GS 位于 7 个波束的中心。图中,点波束 1,2,3,6 均只包含位于波束中心位置的 MES 用户;点波束 0 中的用户 MES1、MES59 位于波束

的边缘位置,与 GS4 所在波束相邻;用户 MES3 位于 GS4 所在波束的边缘位置,与 GS5 所在波束相邻;用户 MES112、MES113、MES103 位于 GS5 波束中,与 GS4 所在波束相邻;用户 MES118、MES83 位于波束 4 和波束 3 的交界处。

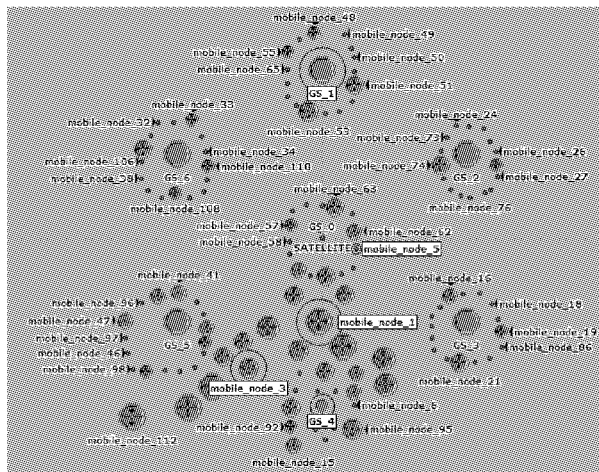


图3 网络模型

## 4 验证与分析

为了分析天线振颤对波束选择过程的影响并检验改进算法的性能,在上述建立的仿真平台上进行仿真,仿真参数设置如表 1 所示。仿真中,天线振颤方向为纬度振颤。

表 1 仿真实验参数设置

仿真参数	值
波束重选定时器	4 min
$k_1$	$6/d_{new}$
$k_2$	0
仿真时间	2 h

### 4.1 振颤方向对不同地理位置 MES 的影响

本节仿真分析振颤方向对处于不同地理位置的 MES 的影响,这里取三个特殊的 MES 进行影响分析。MES5 处于接近波束 0 中心的位置,MES1 位于波束 0 的纬度边缘,MES3 位于波束 4 的经度边缘,振颤频率为 0.2 Hz,振颤最大幅度为 0.1°。仿真时,滞后余量为 0 dB。将 OPNET 仿真数据导出,用 Matlab 画图。

图 4 给出了处于波束中心的 MES5 在天线振颤和不振颤情况下的接收信噪比及波束选择情况的对比,其中,图(a)和图(c)表示没有天线振颤时 MES 进行波束选择时的接收 BCCH 信号的信噪比和波束选择错误次数;图(b)和图(d)表示天线振颤时的情况。通过仿真结果对比,可以看出:天线振颤使处于波束中心的 MES5 接收的信噪比变化不大,不存在波束选择错误的情况。

图 5~6 为处于波束边缘的用户 MES3 和 MES1 接收信噪比和波束选择情况,天线振颤方向为纬度振颤。图(a)、(c)为天线无振颤时的接收信噪比和波束选择情况,图(b)、(d)为天线振颤情况下的仿真结果。通过对比可看出:天线纬度振颤对处于波束经度边缘的 MES3 的影响很小,没有造成波束选择错误;而对处于波束纬度边缘的 MES1 来说,天线振颤使 MES1 接收波束 0 的 BCCH 信号波动,MES1 在波束 0 和波束 4 之间波束乒乓切换,出现波束选择错误的情况。可见相比 MES3,天线纬度振颤对 MES1 的影响更大。

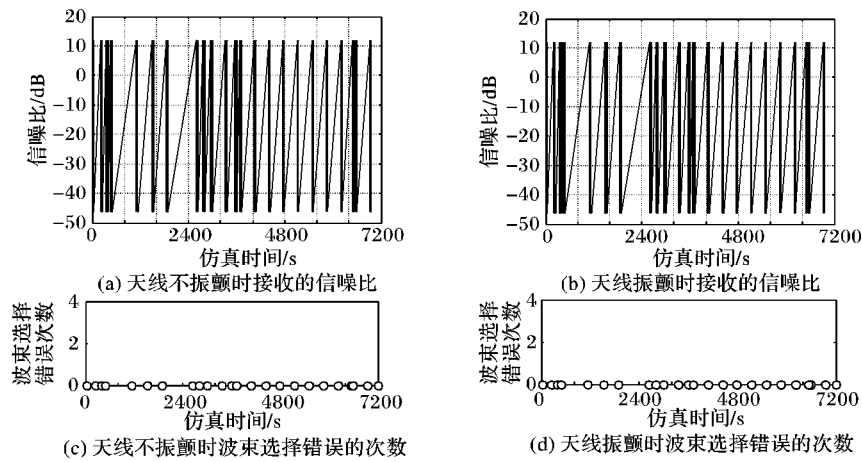


图4 波束中心 MES5 接收信噪比和波束选择情况

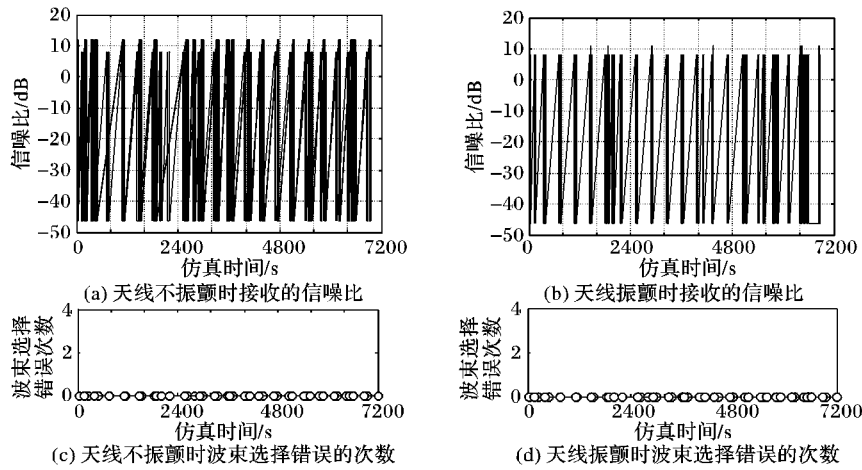


图5 MES3 接收信噪比和波束选择情况

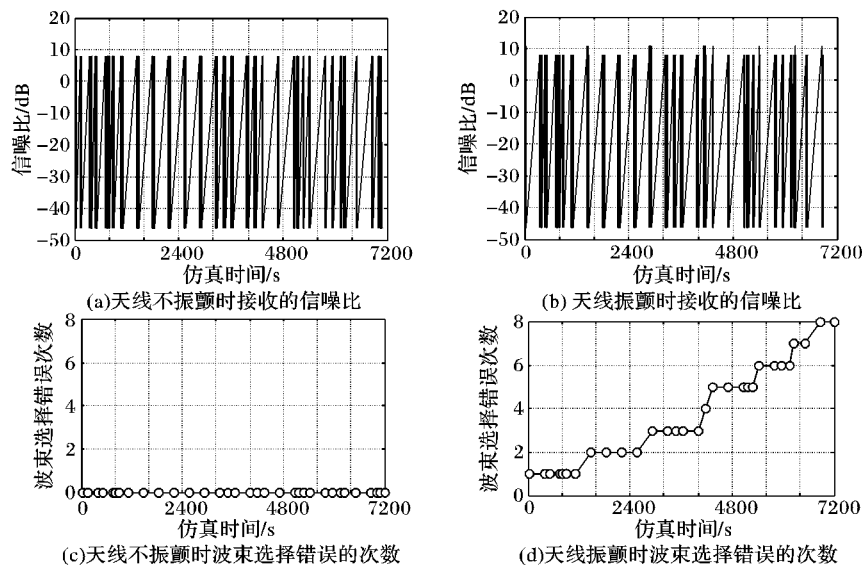


图6 MES1 接收信噪比和波束选择情况

从单个固定位置用户来看,天线振颤情况下,处于波束中心的 MES 尽管接收到的 BCCH 信号会出现起伏,但不会出现波束选择错误;而处于波束边缘的 MES 用户从各个波束接收的 BCCH 信号强度起伏波动,从而影响波束选择工作过程,出现波束选择错误。

#### 4.2 滞后余量对波束选择的影响及算法改进效果

本节仿真分析了天线振颤时传统波束选择算法中滞后余

量取不同值时的波束选择性能,并比较了改进算法与传统算法的性能。天线振颤幅度设为  $1^\circ$ ,传统算法中的滞后余量取值为  $0 \sim 6$  dB。天线振颤频率为  $0.2$  Hz。将 OPNET 的仿真结果用 Matlab 画图。

从图 7 可看出,在无天线震颤时,波束选择错误次数始终为 0,在震颤的情况下,传统算法中,随着静态滞后余量的增大,波束选择错误次数总体趋势为缓慢增加。滞后余量为

0 dB时,波束选择错误次数最少,仿真时间为2 h时,错误次数为174。较之传统算法,改进算法在波束选择过程中动态设置滞后余量,仿真时间为2 h时,波束选择错误次数为147,少于传统算法中静态滞后余量取任何值时的波束选择错误次数。

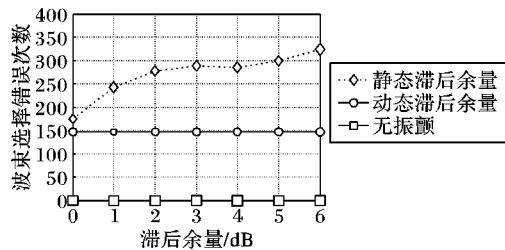


图7 不同静态滞后余量时波束选择性能比较

#### 4.3 最大振颤幅度对波束选择的影响及算法改进效果

本节仿真分析系统模型的波束选择性能随天线最大振颤幅度的变化情况,并比较改进算法与原算法的性能。天线最大振颤幅度值从 $0.5^\circ$ 逐渐变化到 $3.0^\circ$ ,并保持天线振颤频率为0.2 Hz。传统算法中静态滞后余量为0 dB,并将OPNET的仿真结果用Matlab画图。

从图8可看出:无振颤情况下,波束选择错误次数始终为0;振颤的情况下,如图8所示,随着最大振颤角度的增加,传统算法和改进算法的波束选择错误次数都增加,曲线首先缓慢增加,在最大振颤幅度在 $1.5^\circ \sim 2.0^\circ$ 时,快速上升,随后又趋于平缓增加;改进算法的波束选择错误次数上升,随后又趋于平缓增加;改进算法的波束选择错误次数明显小于传统算法中的波束选择错误次数,而且,最大振颤角度越大,改善的效果越明显。

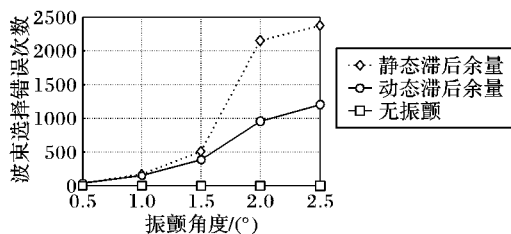


图8 不同最大振颤幅度时波束选择性能比较

## 5 结语

本文分析了天线振颤对波束选择过程的影响,提出了一种动态设置滞后余量的改进型波束选择算法。通过仿真建模证明了天线振颤会导致系统波束选择过程出现很多错误;同时改进算法能够显著减小波束选择的错误次数,弥补了传统的波束选择算法在天线振颤情况下存在的不足。此外,本文没有考虑MES移动对波束选择产生的影响,下一步工作将综合研究天线振颤和MES移动两个因素对波束选择过程的影响。

#### 参考文献:

- [1] YOU B, ZHAO Z, ZHAO Y. Disturbance analysis and suppression of flexible antenna reflector on free-floating satellite antenna[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(12): 2349–3356. (游斌弟, 赵志刚, 赵阳. 柔性天线面对漂浮基星载天线扰动分析及抑制[J]. *航空学报*, 2010, 31(12): 2349–3356.)
- [2] YE Y, XU Z. The research of the air interface technology of GMR-1 system[J]. *Electronics Quality*, 2012(11): 6–10. (叶益林, 徐子平. GMR-1系统空口技术研究[J]. *电子质量*, 2012(11): 6–10.)

- [3] ETSI. TS 101 376-1-3 V1.1.1, GEO-mobile radio interface specifications; part 1: general specifications; sub-part 3: general system description; GMR-1 01.202[S]. Sophia Antipolis, France: ETSI, 2001.
- [4] ETSI. TS 101 376-3-10 V1.2.1, GEO-mobile radio interface specifications; part 3: network specifications; sub-part 10: functions related to Mobile Earth Station (MES) in idle mode; GMR-1 03.022[S]. Sophia Antipolis, France: ETSI, 2002.
- [5] ETSI. TS 101 376-5-2 V1.2.1, GEO-mobile radio interface specifications; part 5: radio interface physical layer specifications; sub-part 2: multiplexing and multiple access; stage 2 service description; GMR-1 05.002[S]. Sophia Antipolis, France: ETSI, 2002.
- [6] ETSI. TS 101 376-5-6 V1.3.1, GEO-mobile radio interface specifications (release 1); part 5: radio interface physical layer specifications; sub-part 6: radio subsystem link control; GMR-1 05.008[S]. Sophia Antipolis, France: ETSI, 2005.
- [7] ZHU H, KWAK K S. Adaptive handoff using distance information[C]// VTC 2006: Proceedings of 2006 the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2006: 932–936.
- [8] LI Y, YAN Y S. Optimization for parameters of handoff algorithm with adaptive hysteresis in GSM-R[C]// CCWMC 2009: Proceedings of the 2009 IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing. Stevenage: Institution of Engineering and Technology, 2009: 276–279.
- [9] SONG L, LIU A, TIAN X, et al. Dynamic handoff algorithm for GEO mobile satellite system[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(11): 3411–3415. (宋莉, 刘爱军, 田晓钟, 等. GEO卫星移动通信系统的动态切换算法[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(11): 3411–3415.)
- [10] LYU H H, CAI J M, GAN Z M, et al. Satellite communication system[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 1994: 30–31. (吕海寰, 蔡剑铭, 甘仲民, 等. *卫星通信系统*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1994: 30–31.)
- [11] XIAO Y, XUE Y, ZENG X. Simulation analysis of composite multi-beam antenna on the GEO mobile communication satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(3): 74–79. (肖永轩, 薛永, 曾小金. GEO移动通信卫星合成多波束天线仿真分析[J]. *航天器工程*, 2010, 19(3): 74–79.)
- [12] ZHU C, DONG Y. Network simulation technology and its application based on OPNET[J]. *Radio Engineering*, 2013, 43(3): 12–15. (朱辰, 董银虎. 基于OPNET的网络仿真技术研究及其应用[J]. *无线电工程*, 2013, 43(3): 12–15.)
- [13] ZHANG X. Study of making model and simulating for LEO satellite constellation communication system based on OPNET[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (张晓东. 基于OPNET的低轨星座卫星通信系统仿真建模研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.)
- [14] SHEN J, YU H, ZHANG X, et al. OPNET based low earth orbit satellite network simulation platform[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(18): 237–239. (申建平, 虞红芳, 章小宁, 等. 基于OPNET的低轨卫星网络仿真平台[J]. *计算机工程*, 2009, 35(18): 237–239.)
- [15] CHENG Y, WU J, XU Y, et al. A network architecture model for GEO satellite mobile telecommunication system with hybrid onboard processor[C]// CMC 2010: Proceedings of the 2010 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 459–463.