

文章编号: 1001 - 2486(2011)04 - 0107 - 06

关闭部分导航信号阻止区域授时对全球定位授时性能的影响分析*

彭 竞, 聂俊伟, 王飞雪

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:在导航战中,在区域范围内阻止对手使用授时服务可通过关闭战区目标点的所有可见卫星信号来实现。以关闭部分导航信号阻止区域授时服务为例,描述了阻止区域授时服务的导航信号关闭仿真流程,提出了定位授时性能评估方法,并就关闭部分导航信号阻止区域授时服务对全球定位服务和授时服务产生的影响进行了分析讨论。仿真结果表明,关闭部分导航信号阻止区域授时服务会造成目标点周边地区的用户无法使用定位服务和授时服务,引起全球范围内定位精度的恶化,同时还会降低全球用户的定位可用性和授时可用性。

关键词:卫星导航系统;导航战;部分导航信号关闭;阻止区域授时

中图分类号:TN967.1 文献标识码:A

An Analysis of the Performance of Global Positioning and Timing Service Effected by Partially Turning off Navigation Signals for Preventing Timing Service in Local Area

PENG Jing, NIE Jun-wei, WANG Fei-xue

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the navigation war, the prevention of timing service to adversaries in local area can be realized by turning off all the navigation signals of visible satellites artificially. This study takes turning off the navigation signal for preventing the timing service in local area as an example, describing the simulation process of prevention of timing service by turning off the navigation signal in local area, and puts forward the evaluation method of positioning and timing performance as well. The effect of preventing timing service on the performance of global positioning and timing service is analyzed subsequently. The results imply that, with the prevention of timing service in local area by partially turning off the navigation signal, both positioning and timing service are limited to the civilian users around the site, and the accuracy of positioning will become worse in the global area. Moreover, the availabilities of positioning and timing will be decreased in global area under the circumstance of partially turning off the navigation signal for preventing the timing service in local area.

Key words: GNSS; navigation war; partially turning off the navigation signal; prevention of timing service in local area

导航战的主要目的是在战区内阻止对手对定位、导航以及授时功能的使用,并且保持己方在战区内对上述功能的使用,同时保护第三方在战区外的和平使用^[1]。在未来的反恐战争中,导航战也将成为取得反恐战争胜利的重要环节之一^[2]。在导航战中,为了阻止对手使用己方的民用导航服务,可采取关闭己方民用信号的措施。阻止定位服务可通过关闭战区目标点部分可见卫星的导航信号,使目标点的可见卫星数小于满足定位功能的最少可见卫星数;阻止授时服务则可通过关闭目标点所有可见卫星的导航信号,使目标点的可见卫星数为0颗,从而使其无法完成授时功能。

以上两种导航信号关闭方案都可能对全球范围内的定位服务和授时服务产生不同的影响,目前很少有文献对该影响进行定量分析。本文着重对关闭导航信号阻止区域授时服务对全球导航定位服务和授时服务性能的影响进行了仿真分析,以GPS星座为例,针对某选取点所接收的卫星信号,通过关闭该点所有的可见卫星信号使其无法使用授时服务,并对24h内阻止目标点授时服务对全球范围内的定位服务以及授时服务性能的影响进行了仿真分析。

如不作特别说明,文中所提到的“阻止授时服务”均指将目标点所有可见卫星的导航信号关闭,

* 收稿日期:2010-12-23

作者简介:彭竞(1981—),女,博士生。

使目标点的可见卫星数为0颗,从而无法使用授时服务。

1 区域授时服务阻止方法及定位授时性能影响评估方法

1.1 区域授时阻止方法

阻止目标点使用授时服务,需将目标点的可见卫星信号全部关闭,使其可观测卫星数降至0颗。卫星可见性的定义为:用户对卫星进行观测的仰角大于遮蔽角时,则认为该卫星可见,否则认为卫星不可见。用户对卫星的仰角为接收机天线仰望卫星的视线与接收机天线所在水平面构成的夹角^[3],考虑到大气传播、高层建筑以及其他物体对卫星信号的遮挡或多路径效应,遮蔽角通常设为 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。

假设所选取的目标点在某观测历元的可见卫星数为 n 颗,关闭该目标点导航信号阻止区域授时服务的仿真流程如图1所示。

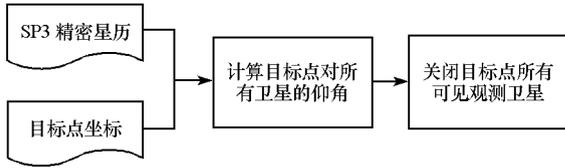


图1 阻止区域授时服务仿真流程图

Fig.1 The simulation process of timing service prevention

1.2 不可定位影响区域定义

为了评估某观测时间段内关闭导航信号阻止区域授时服务对全球定位服务性能的影响,对某已知选取点的可见卫星信号全部关闭,将全球经纬度分别按照 1° 的间隔划分为 360×180 个格网点,采用IGS精密星历对24h内关闭导航信号阻止区域授时服务对全球不可定位区域进行统计。

部分时段(Part-time)不可定位影响区域定义为:某观测时间段内,在关闭导航信号阻止目标点使用授时服务的条件下,全球范围在部分观测时段不可定位的区域所构成的集合。部分时段不可定位影响区域的集合表示如式(1)、(2)所示,其中 T 为总观测历元数, M 为格网点总数; k 表示第 k 个观测历元; i 表示第 i 个格网点; $PVT_{av, Grid_i}(k)$ 表示第 i 个格网点在第 k 个观测历元时刻定位服务是否可用的逻辑变量,当 $PVT_{av, Grid_i}(k) = 0$ 时表示定位服务不可用,当 $PVT_{av, Grid_i}(k) = 1$ 时表示定位服务可用。在整个观测时间段内,若存在某个观测历元 k 使得第 i 个格网点的定位服务不可用,则 A_i 取该格网点 $Grid_i$;否则 A_i 为空集。

$$S_{pvt_any} = \bigcup_{i=1}^M \{A_i\} \quad (1)$$

$$A_i = \begin{cases} Grid_i & \text{if } \exists k \in [1, T], \text{ s.t. } PVT_{av, Grid_i}(k) = 0 \\ \phi & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

全时段(Full-time)不可定位影响区域定义为:某观测时间段内,在关闭导航信号阻止目标点使用授时服务的条件下,全球范围在整个观测时段内始终不可定位的区域所构成的集合。全时段不可定位影响区域的集合表示如式(3)、(4)所示,式中符号定义同上。在整个观测时间段内,若对于任意观测历元 k 都使得第 i 个格网点的定位服务不可用,则 A_i 取该格网点 $Grid_i$;否则 A_i 为空集。

$$S_{pvt_all} = \bigcup_{i=1}^M \{A_i\} \quad (3)$$

$$A_i = \begin{cases} Grid_i & \text{if } \forall k \in [1, T], \text{ s.t. } PVT_{av, Grid_i}(k) = 0 \\ \phi & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

1.3 不可授时影响区域定义

格网点划分及评估条件同不可定位影响区域,采用IGS精密星历对24h内关闭导航信号阻止区域授时服务对全球不可使用授时区域进行统计。

部分时段(Part-time)不可授时影响区域定义为:某观测时间段内,在关闭导航信号阻止目标点使用授时服务的条件下,全球范围在部分观测时段不可授时的区域所构成的集合。

部分时段不可授时影响区域的集合表示如式(5)、(6)所示, $TIME_{av, Grid_i}(k)$ 表示第 i 个格网点在第 k 个观测历元时刻授时服务是否可用的逻辑变量,当 $TIME_{av, Grid_i}(k) = 0$ 时表示授时服务不可用,当 $TIME_{av, Grid_i}(k) = 1$ 时表示授时服务可用。在整个观测时间段内,若存在某个观测历元 k 使得第 i 个格网点的授时服务不可用,则 A_i 取该格网点 $Grid_i$;否则 A_i 为空集。

$$S_{time_any} = \bigcup_{i=1}^M \{A_i\} \quad (5)$$

$$A_i = \begin{cases} Grid_i & \text{if } \exists k \in [1, T], \text{ s.t. } TIME_{av, Grid_i}(k) = 0 \\ \phi & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

全时段(Full-time)不可授时影响区域定义为:某观测时间段内,在关闭导航信号阻止目标点使

用授时服务的条件下,全球范围在整个观测时段内一直不可授时的区域所构成的集合。全时段不可授时影响区域的集合表示如式(7)、(8)所示,式中符号定义同上。在整个观测时间段内,若对于任意观测历元 k 都使得第 i 个格网点的授时服务不可用,则 A_i 取该格网点 $Grid_i$; 否则 A_i 为空集。

$$S_{\text{time_all}} = \bigcup_{i=1}^M \{A_i\} \quad (7)$$

$$A_i = \begin{cases} Grid_i & \text{if } \forall k \in [1, T], \text{ s.t. } TIME_{av, Grid_i}(k) = 0 \\ \phi & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

1.4 GDOP 值退化评估方法

几何精度因子(Geometric Dilution of Precision, GDOP)表示卫星和用户的相对几何布局对位置时间(Position and Time, PT)解的误差的影响,代表了从伪距测量误差的标准偏差到 PT 解的放大情况^[3]。GDOP 定义如式(9)所示,其中 σ_{URE} 为用户等效距离误差,方程左侧部分为 PT 解的标准误差。

$$\sqrt{\sigma_{x_u}^2 + \sigma_{y_u}^2 + \sigma_{z_u}^2 + \sigma_{t_u}^2} = \text{GDOP} \times \sigma_{\text{URE}} \quad (9)$$

GDOP 与位置精度因子 PDOP 和时间精度因子 TDOP 的关系为:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{PDOP}^2 + \text{TDOP}^2} \quad (10)$$

本文对“GDOP 值退化”定义为关闭导航信号后用户的 GDOP 值相对于关闭信号前的 GDOP 值的增大情况。参考用户测距精度指示值(User Range Accuracy Index, URAI)的等级划分^[4],将关闭导航信号后 GDOP 值的退化情况划分为 12 个等级。假设用户等效距离误差 σ_{URE} 为 $5.3\text{m}^{[4]}$, GDOP 值退化等级指示值、门限值以及相应的 PT 解的标准误差如表 1 所示。当 GDOP 值退化等级为 0 时,表明信号关闭前后用户的 GDOP 值保持原值不变;GDOP 值退化等级为 12 时,表明信号关闭后用户的可见卫星数小于或等于 3 颗,无法计算 GDOP 值。

为了评估在阻止区域授时条件下全球 GDOP 值的退化情况,本文分别定义了最大 GDOP 退化程度和最小 GDOP 退化程度:

(1)最大 GDOP 退化程度是指在总的观测时间段内,全球每个格网点分别取各自所达到的最大的 GDOP 退化等级组成的 GDOP 值集合。

(2)最小 GDOP 退化程度是指在总的观测时间段内,全球每个格网点分别取各自出现的最小的 GDOP 退化等级组成的 GDOP 值集合。

表 1 GDOP 退化等级划分表

Tab.1 Division of degradation grade of GDOP

退化等级	GDOP 取值范围	PT 解 标准误差(m)
0	与信号关闭前一致	与信号关闭前一致
1	0.45 ^① - 1.3	2.4 - 6.85
2	1.3 - 1.8	6.85 - 9.65
3	1.8 - 2.6	9.65 - 13.65
4	2.6 - 4.5	13.65 - 24.0
5	4.5 - 6.3	24.0 - 33.5
6	6.3 - 9	33.5 - 48.0
7	9 - 18	48.0 - 96.0
8	18 - 36	96.0 - 192.0
9	36 - 64	192.0 - 384.0
10	64 - 148	384.0 - 786.0
11	> 148	> 786.0
12	-	可见卫星数 ≤ 3 颗

①为 GDOP 理论最小值

1.5 定位可用性和授时可用性

(1)定位可用性

定位可用性是指导航系统的定位服务可以使用的时间百分比^[3]。该指标的评价与用户所设定的观测卫星遮蔽角以及解的精度水平(即最大可接受 DOP 值门限)有关。对普通民用用户(SPS 等^[5])规定 $\text{PDOP} \leq 6, \text{TDOP} \leq 2$, 根据式(10),最大可接受的 GDOP 门限为 6.3,即观测点的 GDOP 值大于 6.3 时(对应退化等级为 6 级以上),则认为定位服务不可用。

定位可用性由式(11)计算得到:

$$A_{\text{PVT}} = \frac{\sum_{k=1}^T \text{PVT}_{av, Grid_i}(k)}{T} \quad (11)$$

其中 T 为总观测历元数; $\text{PVT}_{av, Grid_i}(k)$ 为第 i 个格网点在第 k 个观测历元定位服务可用性是否可用的逻辑变量,若 GDOP 值小于或等于 6.3, 则 $\text{PVT}_{av, Grid_i}(k) = 1$, 表明定位服务可用;若 GDOP 值大于 6.3, 则 $\text{PVT}_{av, Grid_i}(k) = 0$, 表明定位服务不可用。

(2)授时可用性

参考定位可用性定义,可得到授时可用性定义:授时可用性是指导航系统的授时服务可以使用的时间百分比。在规定遮蔽角的条件下,如观测点的可见卫星数小于 1 颗,则认为授时服务不

可用。

授时可用性可由式(12)计算得到:

$$A_{\text{TIME}} = \frac{\sum_{k=1}^T \text{TIME}_{aw, \text{Grid}_i}(k)}{T} \quad (12)$$

其中 $\text{TIME}_{aw, \text{Grid}_i}(k)$ 为第 i 个格网点在第 k 个观测历元授时服务可用性是否可用的逻辑变量,若可见卫星数大于或等于 1 颗,则 $\text{TIME}_{aw, \text{Grid}_i}(k) = 1$,表明授时服务可用;若可见卫星数小于 1 颗,则 $\text{TIME}_{aw, \text{Grid}_i}(k) = 0$,表明授时服务不可用。

2 关闭导航信号阻止区域授时对全球定位性能的影响

本文选取目标点坐标为(34.57°N, 69.22°E),采用 2010 年 5 月 29 日 6 时至 2010 年 5 月 30 日 6 时(UTC 时间)的 SP3 精密星历(PRN01 和 PRN25 的星历未包含),观测历元采样间隔为 15min,对 24h 内关闭导航信号阻止区域授时服务对全球范围内的定位影响进行了仿真。

2.1 不可定位影响区域

(1)24h 关闭导航信号阻止授时服务的部分时段不可定位区域

图 2 为关闭目标点可见卫星信号阻止其授时服务,24h 全球范围内部分时段不可定位区域示意图。图中深色点表示不可定位区域,其中最远不可定位点的坐标为(51.43°S, 130.22°E),距离目标点约为 9824km,全球约有一半的区域不可使用定位服务,该影响范围已大大超出了战区范围的定义(450km ~ 1200km 以上)^[6]。

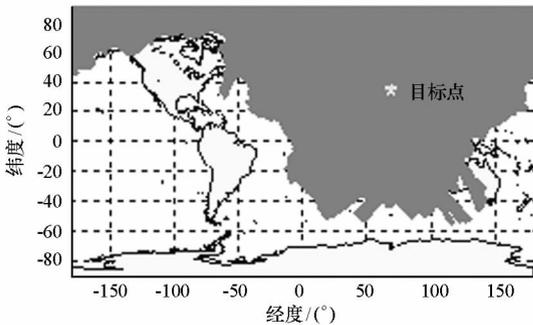


图 2 24h 关闭导航信号阻止区域授时服务全球部分时段不可定位区域示意图

Fig.2 Area with unavailable positioning service in part time by preventing the timing service in local area over a 24 hour period

(2)24h 关闭导航信号阻止区域授时服务的全时段不可定位区域

图 3 为关闭目标点可见卫星信号阻止其授时服务,24h 全球范围内全时段不可定位区域示意

图。其中最远不可定位点的坐标为(23.57°N, 90.22°E),距离目标点约为 2359km,全时段不可定位影响区域面积约为 4 572 421km²,该影响范围同样也超出了战区范围的定义。

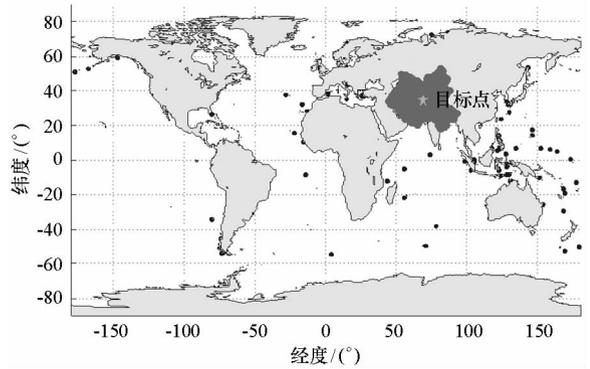


图 3 24h 关闭导航信号阻止区域授时服务全球全时段不可定位区域示意图

Fig.3 Area with unavailable positioning service in full time by preventing the timing service in local area over a 24 hour period

2.2 GDOP 值退化评估

阻止区域授时服务需对大量卫星信号进行关闭,从而使全球格网点的可见卫星数急剧减少,因此会对全球范围内 GDOP 值产生一定的影响。

图 4 为 24h 内关闭导航信号阻止区域授时服务,全球 GDOP 值退化示意图。图 4(a)为 24h 内各格网点的最大 GDOP 退化程度分布图,图 4(b)取 24h 内各格网点的 GDOP 退化程度分布图。

仿真结果表明,24h 内关闭导航信号阻止区域授时服务,最恶劣的情况下可造成全球约 43% 以上的地区无法使用民用定位服务,如图 4(a)所示。除南美洲地区及西太平洋地区的 GDOP 受到的影响较小外,亚欧大陆、非洲大陆及印度洋地区均无法定位;北美地区 GDOP 值最大恶化至 18 ~ 36(退化等级 7 ~ 8 级);大洋洲地区 GDOP 值恶化至 9 ~ 18(退化等级 6 ~ 7 级),部分地区恶化至 64 以上(退化等级 9 级以上)。即使在 GDOP 值最小退化程度的情况下,如图 4(b)所示,会造成中东地区无法使用定位服务,我国西部地区 and 俄罗斯南部地区的 GDOP 值恶化至 6.3 ~ 18(退化等级 6 ~ 7 级)。

表 2 中给出了不同 GDOP 值退化等级的格网点占全球格网点总数的百分比。由表 2 可以看出,24h 内关闭导航信号阻止区域授时服务,在 GDOP 值最大退化程度下,全球有 66.18% 的地区的 GDOP 值增大到 6.3 以上(PT 解的误差增 33.5m 以

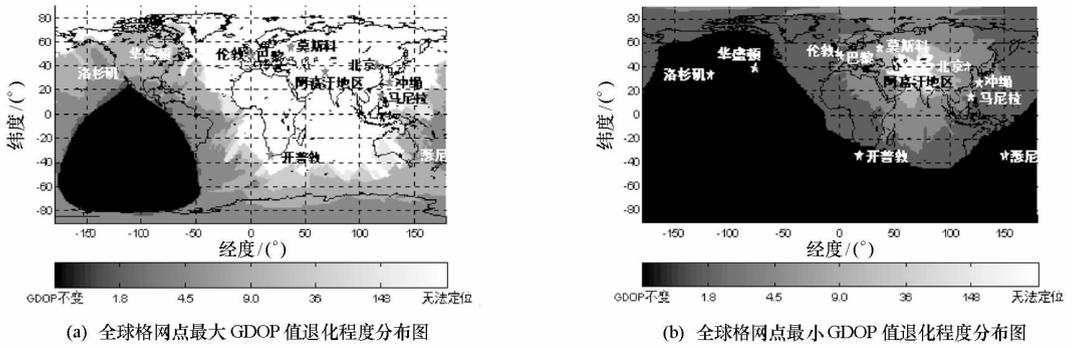


图4 24h内关闭导航信号阻止区域授时服务全球GDOP值退化程度分布图

Fig.4 Pattern of degradation grade of GDOP value by preventing the timing service in local area over a 24 hour period

表2 24h内关闭导航信号阻止单点授时服务全球格网点GDOP值退化等级统计表

Tab.2 Statistic of global grid points with GDOP degradation over a 24 hour period

GDOP 值退化等级	0级	1~5级	6~11级	12级
	(GDOP 不变)	$(0.45 < GDOP \leq 6.3)$	$(GDOP > 6.3)$	(无法定位)
格网点 最大 GDOP 退化程度	15.22%	18.60%	22.32%	43.86%
统计 最小 GDOP 退化程度	55.33%	40.33%	2.89%	1.45%

上,退化等级6级以上),即全球66.18%的地区无法实现满足普通民用用户的定位服务。在GDOP值最小退化程度下,全球仍有4.34%的地地区的GDOP值增大到6.3以上。

2.3 定位可用性评估

关闭部分导航信号也会使全球用户的定位可用性受到一定影响。仿真中假定全球格网站点点的天线在任意时刻不受遮挡,遮蔽角设为 10° ,本文规定“定位服务不可用”的条件为 $GDOP > 6.3$,因此各格网点在理想情况下的定位可用性为100%。表3给出了24h内关闭导航信号阻止区域授时服务的情况下不同定位可用性等级的全球格网点的统计,从表中可以看出,关闭导航信号阻止区域授时服务后,全球范围内仅有31%的格网点的定位可用性可达100%,相比理想情况下下降了69%,有4.34%的格网点定位可用性为0%,20.9%的格网点定位可用性不足50%。

表3 24h内关闭导航信号阻止单点授时服务全球格网点定位可用性统计表

Tab.3 Statistic of availability of positioning under the circumstance of timing service prevention in local area over a 24 hour period

定位可用性	格网点统计
0%	4.34%
$> 0\% \text{ 且 } < 50\%$	16.56%
$\geq 50\% \text{ 且 } < 90\%$	25.75%
$\geq 90\% \text{ 且 } < 100\%$	22.35%
100%	31.00%

3 关闭单点民用授时服务对全球授时服务的影响

目标点及SP3精密星历的选取同上节,仿真条件不变,对24h内关闭导航信号阻止授时服务对全球范围内的授时影响进行了仿真。

3.1 不可授时影响区域

(1)24h 关闭导航信号阻止区域授时服务部分时段不可授时区域

图5为关闭目标点可见卫星信号阻止其授时服务,24h全球范围内部分时段不可授时区域示意图。图中深色点表示不可授时区域,其中最远不可授时点的坐标为 $(14.57^\circ\text{N}, 18.22^\circ\text{E})$,距离目标点5378km,部分时段不可授时区域面积约为 $36\ 881\ 069\text{km}^2$,该面积已超出战区范围的定义。

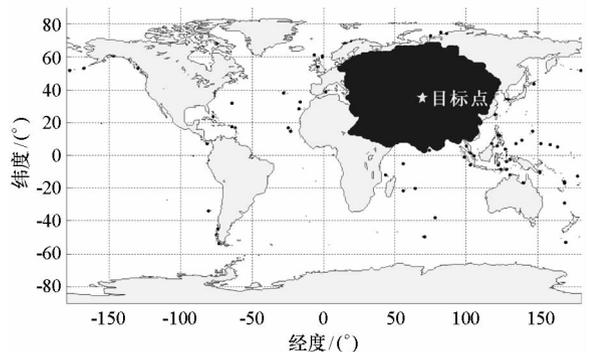


图5 24h关闭导航信号阻止区域授时服务部分时段不可授时区域示意图

Fig.5 Area with unavailable timing service in part time by preventing the timing service in local area over a 24 hour period

(2)24h 关闭导航信号阻止区域授时服务全时段不可授时区域

图 6 为关闭目标点民用授时服务,24h 全球范围内全时段不可授时区域示意图。图中深色点表示不可授时区域。其中最远不可授时点的坐标为(34.62°N, 69.27°E),距离目标点约为 7.2km,全时段不可授时影响区域面积约为 65km²。

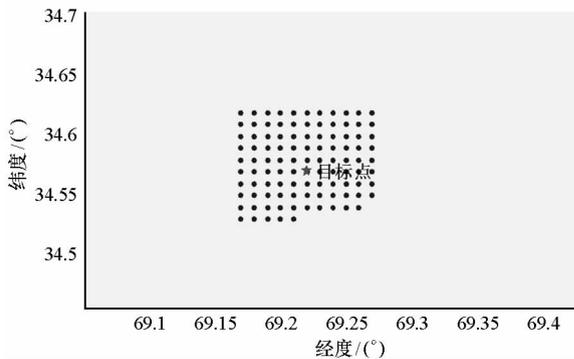


图 6 24h 关闭导航信号阻止区域授时服务全时段不可授时区域示意图

Fig.6 Area with unavailable timing service in full time by preventing the timing service in local area over a 24 hour period

3.2 授时可用性评估

仿真中假定全球格网点站点天线在任意时刻不受遮挡,遮蔽角设为 10°,本文“授时服务不可用”的条件为格网点的可见卫星数小于 1 颗,因此各格网点在理想情况下的授时可用性可达 100%。从表 4 中可以看出,关闭导航信号阻止区域授时服务后,有 0.024% 的格网点的授时可用性小于 10%,0.463% 的格网点的授时可用性不足 50%,约有 3.272% 的格网点的授时可用性不足 90%。

表 4 24h 内关闭导航信号阻止区域授时服务全球格网点授时可用性统计表

Tab.4 Statistic of availability of timing by preventing the timing service in local area over a 24 hour period

授时可用性	格网点统计
10%	0.024%
≥10% 且 < 50%	0.439%
≥50% 且 < 90%	2.808%
≥90% 且 < 100%	4.504%
100%	92.224%

4 结论

在导航战中,可通过关闭导航信号的方法来阻止对手使用己方的授时服务,本文主要针对关闭导航信号阻止区域授时服务对全球定位服务和

授时服务性能的影响进行了定量分析,文中采用的分析方法是信号可视性分析方法在卫星导航信号关闭情况下的特殊应用,本文的分析方法和结论可为未来导航战应用以及导航信号安全管理提供一定的理论支撑。仿真结果表明,关闭导航信号阻止区域授时服务,会造成全球约一半范围内的民用用户无法使用定位服务,导致全球民用用户的定位精度产生不同程度的恶化,同时还会降低全球用户的定位可用性和授时可用性。因此,对于使用同一卫星导航系统的作战双方而言,采用关闭导航信号阻止区域授时服务的方法来抑制对手使用己方的定位服务和授时服务需付出较大的代价。此外,当对手可利用多卫星导航系统的情况下^[5,7-8],关闭单一卫星导航系统的导航信号来阻止区域授时服务并不能取得较明显的成效^[9],因此在导航战中应尽量采用压制导航信号实施干扰^[10]的方法来阻止对手使用己方的定位或授时服务。

参考文献:

- [1] Eren M, Davison S, Schmidt G, et al. Basic Guide to Advanced Navigation [EB]. North Atlantic Treaty Organization (NATO) and Research Technology Organization (RTO), 2004.
- [2] Green G L, Wollam J. The Global Positioning System Interference and Navigation Tool (GIANT) [C]//IEEE Aerospace Conference, 1999: 29-38.
- [3] Kaplan E D, Hegarty C. J. Understanding GPS: Principles and Applications, Second Edition [M]. Norwood, MA: Artech House, 2006.
- [4] Parkinson B W, Spiker J Jr. Global Positioning System: Theory and Applications [M]. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.
- [5] Feng Y, Rizos C, Moody M. Exploring Performance Benefits from Multiple Satellite Systems and Multiple Carrier Signals Using GPS and Virtual Galileo Measurements [C]//IGNSS Symposium, 2006: 76.
- [6] Castelloe M, Lamkin A, Noerpel A, et al. Communication Network Initialization Apparatus and Method for Fast GPS-Based Positioning [P]. United State Patent, vol. US6400319B1, El Segundo, CA (US): Hughes Electronics Corporation, 2002.
- [7] Feng Y. Combined Galileo and GPS: A Technical Perspective [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2003, 2(1): 67-72.
- [8] McDonald K D. The Modernization of GPS: Plans, New Capabilities and the Future Relationship to Galileo [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2002, 1(1): 1-17.
- [9] Rizos C. Multi-Constellation GNSS/RNSS from the Perspective of High Accuracy Users in Australia [J]. Journal of Spatial Science, 2008, 53(2): 29-63.
- [10] The Future of the Global Positioning System [R]. Defense Science Board October, 2005.