

GPS 转发欺骗式干扰时延分析

闫占杰, 吴德伟, 刘海波, 毛虎

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 在 GPS 转发欺骗式干扰中, 转发时延是一项关键技术, 当转发时延不合理时, 会使接收机钟差改变, 容易被识别, 降低欺骗干扰的成功率。利用 GPS 伪距定位原理, 推导了转发时延的算法, 并针对不同的计算结果分析其对接收机钟差的影响。得出的结论为: 当被转发卫星到转发器的距离与转发器到真实点距离之和不大于被转发卫星到虚拟点的距离时, 干扰不会对接收机钟差产生影响, 否则会影响接收机的钟差。从这个角度出发, 对 GPS 转发欺骗式干扰源的部署位置做了分析, 当转发器位于被转发卫星和真实点的连线上, 可以使不对接收机钟差产生影响的虚拟点的选择范围最大。

关键词 GPS 转发欺骗式干扰; 转发时延; 接收机钟差; 干扰源位置

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.016

中图分类号 TN972 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0067-04

Analysis of Time-delay in GPS Repeater Deception Jamming

YAN Zhan-jie, WU De-wei, LIU hai-bo, MAO hu

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In GPS repeater deception jamming, time-delay is a key technique, when time-delay is illogical, receiver's clock off-sets will be changed, deception jamming can be identified easily and the success rate of the deception jamming will be reduced. The theory of GPS Pseudo-range is used in this paper to derive the time-delay algorithm and analyze the effect of different calculation results on receiver's clock off-sets. The conclusion is obtained as that when the distance between transmitted satellite and jammer plus the distance between jammer and the real locus is no more than the distance between transmitted satellite and fictitious locus, jamming has no effect on receiver's clock off-sets, otherwise it has an effect on receiver's clock off-sets. From this point of view, the deployment location of jammer is analyzed; while the jammer is situated on the line formed by satellite and real locus, the selection scope of fictitious locus with no effect on receiver's clock off-sets is the largest.

Key words: GPS repeater deception jamming; time-delay; receiver's clock off-sets; jammer's location

在现代战争中 GPS 发挥着很大的作用, 如果能有效干扰对方 GPS 系统, 就会削弱对方的力量, 赢得战争的主动权。GPS 干扰可以分为压制式干扰和欺骗式干扰^[1]。点波束技术与高增益美国军用接

收机结合可以使系统具有 38 dB 的抗干扰能力^[2], 大大的增加了压制干扰的难度, 所以这时应该重点考虑欺骗式干扰。

欺骗式干扰分为产生欺骗式干扰和转发欺骗式

收稿日期: 2013-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174194)

作者简介: 闫占杰(1989-), 男, 陕西吴起人, 硕士生, 主要从事卫星导航与导航对抗研究。

E-mail: yanzhanjiewt@163.com

干扰。产生欺骗式干扰需要知道伪码码型和当时的导航电文^[3],由于无法得到M码和Y码,因此无法对其采用产生欺骗式干扰,较为有效的方法是转发欺骗式干扰。GPS转发欺骗式干扰是利用转发真实的卫星导航信号,并附加一定的时延,使接收机得到错误的伪距,从而导致定位错误。文献[4~5]采用映射的思想,将目标的真实位置与欲欺骗的位置看作一对映射,提出了转发欺骗式干扰的模型,分析了映射解的存在性;文献[6]提出了转发时延算法,并说明了当真实点与虚拟点一定的情况下,时延具有多解性,建立了取值准则;文献[7]利用SYSTEMVIEW平台设计开发了GPS欺骗干扰仿真系统,通过仿真,验证了转发欺骗式干扰原理,得到了各个转发信号的延迟量。以上研究均没有对被干扰的接收机产生钟差的条件进行研究,本文在得出转发欺骗式干扰时延算法的基础上,根据时延的不同情况得到转发干扰对目标接收机钟差的影响,给出对目标接收机钟差无影响时应满足的条件,由此得出转发器的最佳部署范围。

1 GPS转发欺骗式干扰模型

GPS系统通过测量导航信号从卫星到接收机的传播时间,以此来确定接收机到各卫星的距离,利用4颗星(含接收机钟差)实现接收机的定位。GPS转发欺骗式干扰通过改变导航信号在空间的传播时间,对接收机进行欺骗,其模型^[4]见图1。

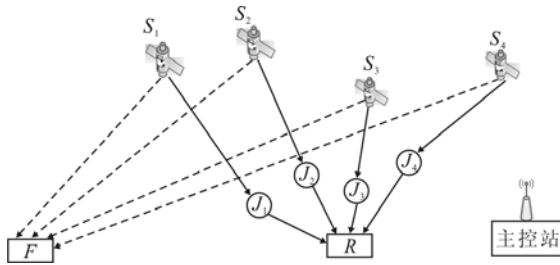


图1 GPS转发欺骗式干扰原理示意图

Fig.1 The schematic diagram of GPS repeater deception jamming

图中, $S_i(i=1,2,3,4)$ 为在某一区域被用来定位的4颗卫星; $J_i(i=1,2,3,4)$ 为空中转发平台,可以是飞机、气球、飞艇等,其核心部件为射频存储器,转发平台将卫星信号接收之后,加入一定时延再发射出去; R 是接收机所在的真实位置; F 为通过转发导航信号使接收机错误的定位位置。整个系统的工作过程:主控站向转发平台注入控制指令,控制指令包括所要转发的卫星序列号和对各颗卫星的转发时延,空中转发平台根据指令,利用智能天线对所要

转发的卫星信号进行接收,同时依据时延控制指令对信号进行延迟处理,然后经功率放大再转发出去。当转发时延选择合适时,会使得在 R 点处的接收机错误的定位到 F 点,从而达到欺骗的效果。这样 R 点和 F 点形成一对映射, R 点为真实点, F 点被称为虚拟点^[4]。

2 转发时延的确定

2.1 转发时延算法

要想使接收机定位到 F 处,则必须满足以下定位方程:

$$\begin{cases} \rho_1 = |S_1 F| + ct_R \\ \rho_2 = |S_2 F| + ct_R \\ \rho_3 = |S_3 F| + ct_R \\ \rho_4 = |S_4 F| + ct_R \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho_i(i=1,2,3,4)$ 为 R 处的接收机到卫星 S_i 的伪距,是由接收机测量得到的; $|S_i F|(i=1,2,3,4)$ 为 F 点到卫星 S_i 的真实距离; c 为光速; t_R 为接收机钟差。

在 R 处的接收机接收到的信号并非仅仅来自卫星,其中经由空中的转发器转发的干扰信号场远远大于GPS卫星信号,占主导作用,因此可以忽略卫星信号的影响^[8]。根据伪距测量原理,在 R 处的接收机利用转发信号定位得到的定位方程为:

$$\begin{cases} \rho_1 = |S_1 J_1| + |J_1 R| + ct_1 + ct_R \\ \rho_2 = |S_2 J_2| + |J_2 R| + ct_2 + ct_R \\ \rho_3 = |S_3 J_3| + |J_3 R| + ct_3 + ct_R \\ \rho_4 = |S_4 J_4| + |J_4 R| + ct_4 + ct_R \end{cases} \quad (2)$$

式中: $|S_i J_i|(i=1,2,3,4)$ 为卫星 S_i 到转发器 J_i 之间的距离; $t_i(i=1,2,3,4)$ 为信号在转发器 J_i 中的时延。

当转发平台、卫星、真实点、虚拟点的位置一定时,调整转发时延,使得卫星到真实点、虚拟点的距离以及转发时延满足:

$$\begin{cases} |S_1 F| = |S_1 J_1| + |J_1 R| + ct_1 \\ |S_2 F| = |S_2 J_2| + |J_2 R| + ct_2 \\ |S_3 F| = |S_3 J_3| + |J_3 R| + ct_3 \\ |S_4 F| = |S_4 J_4| + |J_4 R| + ct_4 \end{cases} \quad (3)$$

则有 $\rho_i = \rho_i(i=1,2,3,4)$,根据GPS的伪距定位原理,定位方程式(1)和式(2)会解算出相同位置,即 F 点,此时 t_i 应该满足:

$$\begin{cases} t_1 = (|S_1 F| - |S_1 J_1| - |J_1 R|)/c \\ t_2 = (|S_2 F| - |S_2 J_2| - |J_2 R|)/c \\ t_3 = (|S_3 F| - |S_3 J_3| - |J_3 R|)/c \\ t_4 = (|S_4 F| - |S_4 J_4| - |J_4 R|)/c \end{cases} \quad (4)$$

式(4)为 GPS 转发欺骗式干扰的时延算法,采用该算法对导航信号进行时延处理,就会使得在 R 点处的接收机错误的定位到 F 点。

2.2 转发时延对接收机钟差的影响

在 2.1 节的讨论中,理论上只要得出卫星、转发器、真实点与虚拟点的位置就可以算出转发器的转发时延,对接收机进行定位欺骗,并且对比式(2)和式(3)可以发现,转发器在时间上真实的模拟了信号从卫星到虚拟点的传播过程,对接收机钟差没有影响。但其中隐含了条件:转发信号过程须满足物理可实现,即转发时延必须为一正数。当式(4)中存在 $t_i(i=1,2,3,4) < 0$ 时,就要对转发时延做出修正,此时就会对接收机钟差带来影响,即产生接收机钟差误差。

如果式(4)的计算结果中 $t_i(i=1,2,3,4)$ 有负数存在,则给 4 个转发器的时延同时加上一个常数 T 作为修正时延,使修正后的时延全部为正数,这时转发器的时延为:

$$t'_i = t_i + T (i=1,2,3,4) \quad (5)$$

将式(5)代入式(2),同时根据式(3)可得:

$$\rho_i = |S_i J_i| + |J_i R| + ct_i + cT + ct_R = |S_i F| + c(T + t_R) \quad (6)$$

式(6)说明,给 4 个转发器同时加上某一个修正时延后,在 R 处的接收机仍然会定位到 F 点,但是此时接收机钟差 t_R 变为:

$$t'_R = t_R + T \quad (7)$$

接收机钟差发生变化时,容易被识别出来,为了减少接收机钟差变化量,应尽量减小 T,因此,在利用式(4)求得的转发时延中有负数存在时,则取 $T = |\min(t_i)| (i=1,2,3,4)$ 为修正时延^[7],此时转发干扰对接收机钟差的影响是最小的。

从上文的分析得出,在对 GPS 接收机进行转发式干扰时,在没有修正时延的情况下,亦即 $t_i(i=1,2,3,4) \geq 0$ 时,转发欺骗式干扰对接收机钟差没有影响,因此,由式(4)可得对接收机钟差无影响的条件为:

$$|S_i F| \geq |S_i J_i| + |J_i R| (i=1,2,3,4) \quad (8)$$

式(8)表明,要对接收机进行无钟差影响的转发欺骗式干扰,必须满足卫星到相应的转发器与转发器到接收机真实点的距离之和不大于相应卫星到虚拟点的距离。从这个角度出发,为了增大虚拟点的可选择范围,就必须减小卫星到转发器和转发器到真实点的距离之和。依据 2 点之间线段最短的原理,在不产生接收机钟差误差的前提下,当接收机真实点和所要转发的卫星位置确定时,转发器位于卫星与接收机真实点的连线上时,能使接收机错误定

位的选择范围最大。

3 仿真分析

在仿真中,卫星、真实点位置引用文献[6]的数据,在地心地固直角坐标系中,在 R 处的接收机用于定位的 4 颗卫星分别为:

- $S_1(9\ 393.9\ \text{km}, 9\ 393.9\ \text{km}, 23\ 010\ \text{km});$
- $S_2(11\ 505\ \text{km}, 19\ 928\ \text{km}, 13\ 285\ \text{km});$
- $S_3(9\ 393.9\ \text{km}, 16\ 271\ \text{km}, 18\ 788\ \text{km});$
- $S_4(13\ 285\ \text{km}, 13\ 285\ \text{km}, 18\ 788\ \text{km}).$

真实点在地球表面上,其位置坐标为: $R(2\ 992.9\ \text{km}, 2\ 095.7\ \text{km}, 5\ 218\ \text{km})$ 。通过采样,将真实点分别欺骗到 100 个点上,这 100 个采样点为: $t = (0.02 : 0.02 : 2)\pi$; $x = (\sin t + 2\ 733.3)\ \text{km}$; $y = (t + 1\ 585.5)\ \text{km}$; $z = (5t + 5\ 505)\ \text{km}$ 。利用文中时延算法对转发器附加时延,对每个虚拟点与真实点在映射过程中对接收机钟差造成的影响进行仿真。

采用 2 组转发器对卫星信号进行转发,其中一组位于对应卫星和真实点的连线上,其坐标为:

- $J_1(3\ 633\ \text{km}, 2\ 825.5\ \text{km}, 6\ 997.2\ \text{km});$
- $J_2(3\ 844.1\ \text{km}, 3\ 878.9\ \text{km}, 6\ 024.7\ \text{km});$
- $J_3(3\ 633\ \text{km}, 3\ 513.2\ \text{km}, 6\ 575\ \text{km});$
- $J_4(4\ 022.1\ \text{km}, 3\ 214.6\ \text{km}, 6\ 575\ \text{km}).$

另外一组不在对应卫星和真实点的连线上,其坐标为:

- $J_1(3\ 010\ \text{km}, 2\ 112\ \text{km}, 5\ 329\ \text{km});$
- $J_2(3\ 175\ \text{km}, 1\ 993\ \text{km}, 5\ 361\ \text{km});$
- $J_3(2\ 947\ \text{km}, 1\ 950\ \text{km}, 5\ 423\ \text{km});$
- $J_4(3\ 364\ \text{km}, 1\ 963\ \text{km}, 5\ 340\ \text{km}).$

分别计算 2 组转发器的转发干扰对接收机钟差的影响,得到的结果见图 2。

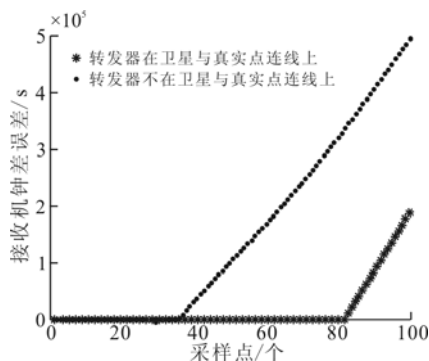


图 2 2 组转发平台对接收机钟差的影响

Fig.2 The influence of receiver's clock off-sets between two groups of jammers

图 2 中横轴表示 100 个虚拟点的序号,纵轴表示将真实点欺骗到不同虚拟点对接收机钟差造成的

影响。当接收机钟差误差为 0 时,表明卫星、转发器、真实点、虚拟点的位置关系满足式(8),否则转发欺骗对接收机钟差产生误差。

从仿真中可以得出以下结论:

1)图中曲线的连续变化表明卫星、转发器、真实点的位置一定时,虚拟点在位置上的连续变化会导致接收机钟差误差的连续变化;

2)当转发器位于卫星与真实点的连线上时,可以增大无接收机钟差误差的虚拟点的范围;

3)当卫星、接收机真实点以及虚拟点位置一定的时候,不同位置分布的转发器对接收机钟差的影响不同,利用位于真实点与对应卫星连线上的转发器进行转发欺骗,所产生的接收机钟差误差小于不在卫星与真实点连线上的转发器转发带来的接收机钟差误差。

4 结语

在 GPS 转发欺骗式干扰中,能否被接收机识别关系到干扰的成败,因此欺骗时应注意以下 2 点:①尽量减少因欺骗干扰对接收机钟差产生的影响;②虚拟点尽量离真实点近,这就要求可选择的虚拟点的范围尽可能的大。本文对 GPS 转发欺骗式干扰的时延进行了研究,得到了时延算法,同时得出了对接收机钟差无影响时转发欺骗所满足的条件;最后得出结论:当转发器位于卫星与真实点的连线上时,能使对接收机钟差不产生影响的虚拟点的范围最大。

参考文献(References):

- [1] 刘海波,吴德伟,卢艳娥,等. BLMS 算法在 GNSS 天线抗干扰中的应用[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2009,10(6):60-64.
LIU Haibo, WU Dewei, LU Yan'e, et al. BLMS algorithm application in GNSS anti-jamming antenna array[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2009,10(6):60-64. (in Chinese)
- [2] 陈贵忠,帅平,曲广吉. 现代卫星导航系统技术特点与发展趋势分析[J]. 中国科学 E 辑, 2009, 39(4): 263-269.
CHEN Guizhong, SHUAI Ping, QU Guangji. The characteristic of modern GNSS and analysis of its development trend[J]. Scientia sinica E, 2009, 39(4): 263-269. (in Chinese)
- [3] 邓明,卢胜军. GPS 干扰方法探究[J]. 通信对抗, 2005, 26(3):24-26.
DENG Ming, LU Shengjun. Reseach in GPS jamming [J]. Communication countermeasures, 2005,26(3):24-26. (in Chinese)
- [4] 杨景曙,曾芳玲,盛琥,等. 通过区域映射实现诱导的 GPS 干扰系统[J]. 电子学报, 2005,33(6):1036-1038.
YANG Jingshu, ZENG Fangling, SHENG Hu, et al. A jamming system through section mapping for GPS navigation[J]. Acta electronica sinica, 2005, 33(6): 1036-1038. (in Chinese)
- [5] Zhang Song, Yang Jingshu, Pan Gaofeng, et al. GPS area-mapping deceiving units region navigation integrative system[C]//Proceedings of 2010 3rd international conference on computer science and information technology. [S. l.]:IEEE press,2010:189-191.
- [6] 张颂. GPS 诱偏干扰暨局域导航一体化可行性研究[D]. 合肥:电子工程学院,2011.
ZHANG Song. Research on feasibility of GPS area-mapping deceiving unites battlefield navigation integrative system[D]. Hefei: Electronic engineering institute, 2011. (in Chinese)
- [7] 王伟,陶业荣,王国玉,等. GPS 欺骗干扰原理研究与建模仿真[J]. 火力与指挥控制, 2009,34(6):115-118.
WANG Wei, TAO Yerong, WANG Guoyu, et al. Study and simulation of GPS deception jamming[J]. Fire control and command control, 2009, 34(6): 115-118. (in Chinese)
- [8] 张颂,杨景曙,潘高峰,等. 诱偏暨导航一体化系统中诱偏时延算法[J]. 安徽大学学报:自然科学版, 2011, 35(1):64-68.
ZHANG Song, YANG Jingshu, PAN Gaofeng, et al. The time-delay algorithmic in GPS area-mapping deceiving unites battlefield navigation integrative system [J]. Journal of Anhui university: natural science edition, 2011,35(1):64-68. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)