

采用双天线载波相位差技术的卫星导航接收机抗欺骗方法*

黄龙, 雍玲, 徐博, 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:针对欺骗干扰信号难以有效实时模拟真实卫星信号空间分布特性的特点,提出利用双天线载波相位差进行欺骗信号检测的方法。分析载波相位差计算的各种误差源,并在此基础上建立针对欺骗信号的二元假设检验。通过理论分析和仿真实验,验证了所提欺骗信号检测技术的有效性,并得出了天线阵基线越长、入射方位角越小,载波相位差检测技术对欺骗信号的检测性能越优的结论。

关键词:全球导航卫星系统;卫星导航接收机;欺骗干扰;载波相位差检测;抗欺骗

中图分类号:TN967.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)04-103-04

Analysis of carry phase difference detection for satellite navigation receivers anti-spoofing

HUANG Long, YONG Ling, XU Bo, WANG Feixue

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

Abstract: For the fact that the spoofer has no way to simulate the space distribution characteristic of the authentic GNSS (global navigation satellite system) signals, a detection technique based on carry phase difference was proposed. All errors of the detection were analyzed, and the multiple hypotheses testing the spoofing detection were built. Through theoretical analysis and simulation tests, the proposed spoofing detection method is verified. Results show that the longer the baseline of the array is, the smaller angle of incidence is, which leads to a better spoofing detection performance of the proposed method.

Key words: global navigation satellite system; satellite navigation receiver; spoofing interference; carry phase difference test; anti-spoofing

由于目前的欺骗干扰源大都采用单一天线发射欺骗信号,因此多路欺骗信号到达接收机天线的方向角完全一致,而不同卫星的真实空间信号到达接收机天线的方向角不会完全相同。利用欺骗信号与真实卫星信号的这一空间特性,通过接收机的多个天线对接收信号进行到达角检测是检测欺骗信号的有效手段^[1]。

针对天线固定安装的导航接收机,提出一种利用双天线载波相位差进行欺骗信号检测的方法。在已知接收机天线阵基线以及姿态条件下,同一路信号在两副天线上表现出的相位差和天线基线长度与信号入射相关。而信号入射角是空间信号的物理传播特性^[2],欺骗干扰源无法通过数字方式改变。以通过卫星星历获取所跟踪卫星的精确位置为先验信息,即可确定真实信号在已知天线阵上的载波相位差,从而实现对欺骗信号的有效检测。本文分析了载波相位差计算的各种误差源,并在此基础上建立了针对欺骗信号的二元

假设检验。最后,通过理论分析和仿真实验,验证了所提出的欺骗信号检测技术的有效性,并得出了天线阵基线越长、入射方位角越小,载波相位差检测技术对欺骗信号的检测性能越优的结论。

1 基本原理

在已知接收机天线阵基线以及姿态条件下(通过对固定安装的天线阵进行预先精密测定),可以采用单路信号相位差检测技术,对接收机正在跟踪的每一路信号进行单路的欺骗干扰检测,从而在所有跟踪信号中挑选出真实卫星信号用于后端定时定位处理,防止欺骗干扰对接收机性能的影响。

不失一般性,假定接收机天线阵处于水平面上并且以两天线间连线所在方向为方位角 0° 位置,那么信号入射关系如图1所示,图中 A, B 表示两个天线阵元所处位置, b 为天线基线长度, S 为入射信号, α 为入射信号俯仰角, β 为入射信号

* 收稿日期:2015-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403413)

作者简介:黄龙(1982—),男,重庆人,讲师,博士,E-mail:huangl386@hotmail.com

方位角。因此信号到达接收天线平面入射角 θ 可表示为:

$$\cos(\theta_i) = \cos(\alpha_i) \cos(\beta_i) \quad (1)$$

其中,下标 i 表示某一路具体接收信号。

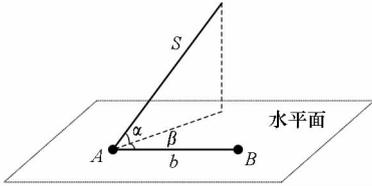


图 1 信号入射角与天线阵位置关系

Fig. 1 Relationship of signal incidence angle and array

由此同一路信号在两副天线上体现出的相位差可表示为:

$$d\varphi_i = |b| \cos(\alpha_i) \cos(\beta_i) + T + \gamma_i \quad (2)$$

其中, T 表示两副天线到接收机的时延差, γ_i 表示对卫星 i 接收的各种载波相位误差之和。即同一路信号在两副天线上表现出的相位差与天线基线长度、信号入射俯仰角以及信号入射方位角相关。

对于处于水平面且基线长度已知的天线阵,通过卫星星历获取所跟踪卫星的精确位置,即可计算得到真实卫星信号到达天线阵的入射俯仰角以及方位角;通过精密时延标定,可以获得两副天线达到接收机信号处理端的时延差;再结合对接收机载波测量误差的估计,即可得到天线阵对真实卫星信号的测量相位差估计值。将接收机对接收到的实际信号相位差测量结果与真实卫星信号的测量相位差估计值相比较,如果误差超出一定的范围即可判定为欺骗干扰信号。

2 检测方法

对于典型的 GPS C/A 码接收机,其载波测量精度一般可达 $0.01 \text{ circle}^{[3]}$,那么式(2)中的载波相位误差之和满足如下条件:

$$\gamma_i < 0.014 \text{ circle} \quad (3)$$

两副接收天线采用相同型号、相同批次的天线,并且经过等长线缆接入接收机,那么天线间的时延差可以控制到亚纳秒量级^[4]:

$$T < 0.1 \text{ ns} \approx 0.15 \text{ circle} \quad (4)$$

接收机从卫星导航系统播发的精密星历数据中获取各卫星的轨道位置,在星历有效龄期内卫星的位置误差在 10 m 之内^[5]。考虑到 GPS 卫星的轨道高度近似为 $26\,600 \text{ km}^{[6]}$,因此由于星历轨道误差导致的卫星信号到达接收天线平面入射角 θ 误差为:

$$\Delta\theta \approx \sin(\Delta\theta) \approx \frac{\Delta\rho}{L} < \frac{10}{26\,600\,000} \text{ (rad)} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)可知,由星历轨道误差导致的卫星信号到达接收天线阵的相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta d\varphi_i &= |b| \cdot |[\cos(\theta_i) - \cos(\theta_i + \Delta\theta)]| \\ &= |b| \cdot \left| 2\sin\left(\frac{2(\theta_i) + \Delta\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \right| \\ &\approx |b| \cdot |\Delta\theta \sin(\theta_i)| \\ &< |b| \cdot \Delta\theta \end{aligned} \quad (6)$$

由于星历轨道误差导致的卫星信号到达接收天线平面入射角误差非常小,因此由此引入的载波相位差完全可以忽略不计。

由以上分析可知,天线阵载波相位差的误差源主要是天线间的时延差。由于接收机对载波相位测量结果误差呈正态分布,因此,对单路信号相位差检测建立检验统计量 ρ ,其在真实卫星信号(假设 H_0)以及欺骗干扰信号(假设 H_1)条件下的概率分布为:

$$\begin{cases} H_0: \rho_i = d\varphi_{i_au} - d\hat{\varphi}_i \sim N(0, B) \\ H_1: \rho_i = d\varphi_{i_sp} - d\hat{\varphi}_i \sim N(d\varphi_{i_sp} - d\hat{\varphi}_i, B) \end{cases} \quad (7)$$

式中,下标 sp 与 au 分别表示欺骗干扰信号和真实卫星信号。

由此可以确定在一定虚警概率下的欺骗信号检测门限 ρ_{th} 以及检测概率为:

$$\begin{cases} P_{fa} = P\{|\rho| > \rho_{th} | H_0\} = 1 - \int_{-\rho_{th}}^{\rho_{th}} p_{N(0,B)}(x) dx \\ P_D = P\{|\rho| > \rho_{th} | H_1\} = 1 - \int_{\rho_{th}}^{\infty} p_{N(d\varphi_{i_sp} - d\hat{\varphi}_i, B)}(x) dx \end{cases} \quad (8)$$

结合式(6)和式(8)可知,单路信号相位差检测法对欺骗干扰信号的检测性能与欺骗信号入射角密切相关:

$$\begin{aligned} d\varphi_{i_sp} - d\hat{\varphi}_i &\approx |b| \cdot |\cos(\theta_{sp}) - \cos(\theta_{au})| \\ &= 2|b| \cdot \left| \sin\left(\frac{\theta_{sp} + \theta_{au}}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta_{sp} - \theta_{au}}{2}\right) \right| \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,当欺骗干扰信号与真实卫星信号的相对于接收机天线阵的入射角相同或者对称时,式(9)恒为 0,即单路信号相位差检测无法正确鉴别欺骗信号与真实卫星信号。同时,当欺骗信号与真实信号入射角一定的条件下,天线阵的基线长度越大, H_1 条件下检验统计量的均值越大,其概率密度分布函数与 H_0 条件下间隔越大,欺骗干扰检测性能越好。

图 2~4 给出了在真实信号入射俯仰角与方位角均为 45° 、虚警概率为 1% 时,不同天线阵基

线长度条件下,欺骗信号入射角与欺骗干扰检测概率的关系,图中红心标注的位置为真实卫星信号的入射角度。

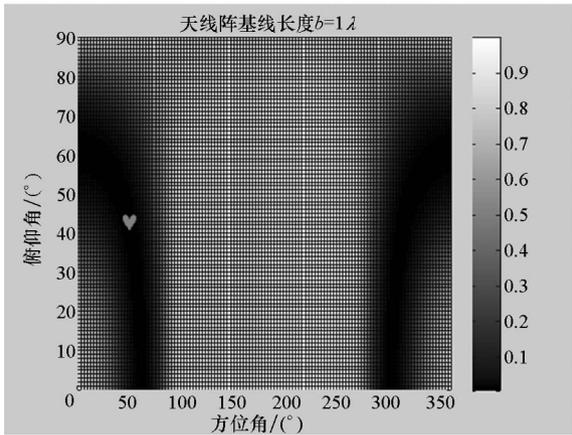


图2 天线阵基线长度为一倍载波波长时欺骗检测能力
Fig.2 Spoofing detection performance when $b = 1\lambda$

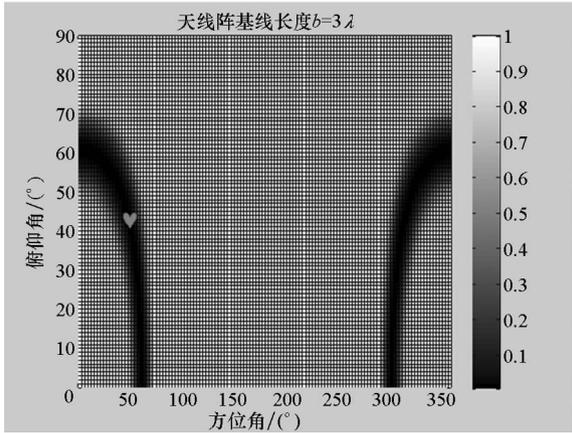


图3 天线阵基线长度为三倍载波波长时欺骗检测能力
Fig.3 Spoofing detection performance when $b = 3\lambda$

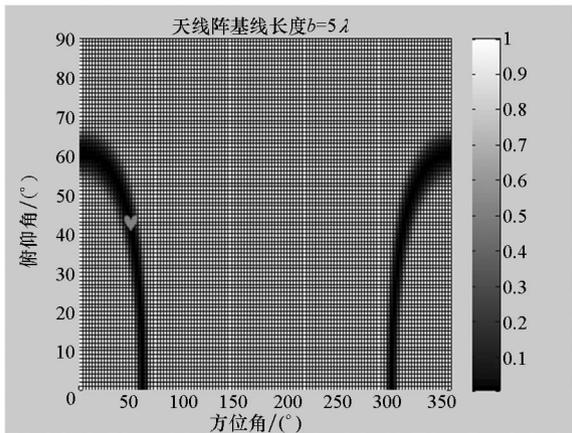


图4 天线阵基线长度为五倍载波波长时欺骗检测能力
Fig.4 Spoofing detection performance when $b = 5\lambda$

由上图可以看出,当欺骗信号入射角与真实信号入射角相近以及相对于天线阵基线对称时,

单路信号相位差检测技术对欺骗干扰的检测性能最差;当欺骗信号俯仰角越低、方位角与天线阵基线趋于平行,欺骗干扰的检测性能越优。同时,天线阵基线长度越长,单路信号相位差检测技术的检测盲区越小,检测性能越好。由于接收天线固定安装且具有抗欺骗需求的导航接收机,一般具有较好的物理隔离措施,干扰方难以获取其天线阵方位信息。因此,在天线阵基线较长的情况下,单路信号相位差检测技术的检测盲区很小,具有良好的欺骗干扰检测效果。

3 仿真验证

以真实信号入射俯仰角与方位角均为 45° 为条件建立仿真验证环境,对不同欺骗信号入射角以及天线阵基线长度进行蒙特卡洛仿真验证^[7]。每种条件下,仿真次数为 10 000 次,得到单路信号相位差检测技术的 ROC 曲线如图 5~7 所示。

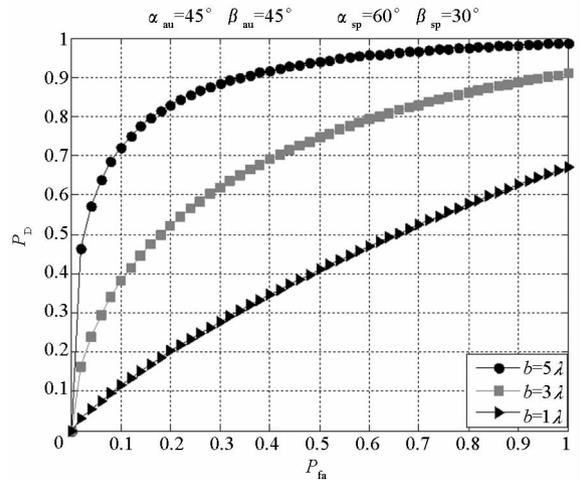


图5 欺骗入射方位角为 60° 时 ROC 曲线
Fig.5 ROC curve when $\theta = 60^\circ$

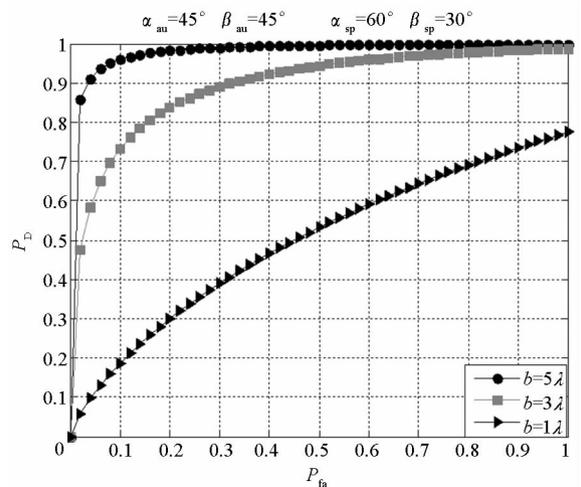


图6 欺骗入射方位角为 50° 时 ROC 曲线
Fig.6 ROC curve when $\theta = 50^\circ$

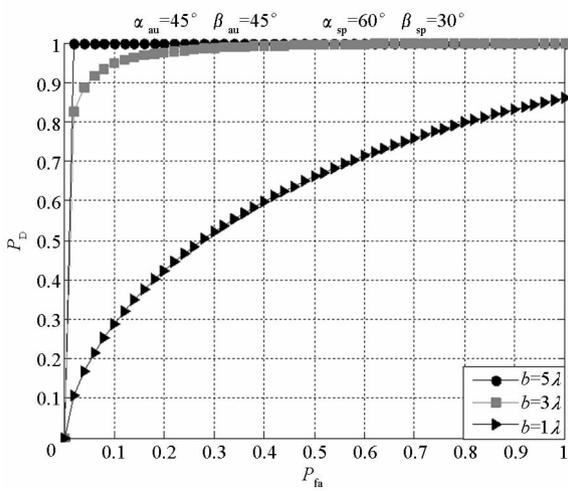


图 7 欺骗信号入射方位角为 40° 时 ROC 曲线
Fig. 7 ROC curve when $\theta = 40^\circ$

由以上各图可以看出：

1) 天线阵基线长度越长, 相位差检测技术对欺骗干扰的检测性能越优;

2) 欺骗信号相对于天线阵基线的入射方位角越小, 即与天线阵基线趋于平行, 相位差检测技术对欺骗干扰的检测性能越优。

以上结论与上一节中理论分析结论一致。

4 结论

针对天线固定安装的导航接收机, 提出一种利用双天线载波相位差进行欺骗信号检测的方法。理论分析和仿真实验结果表明, 只要双天线基线长度大于 3λ (约 0.5 m), 本文提出的相位差检测技术即可在 5% 的虚警概率下实现对 90% 以上单天线发射欺骗攻击的有效检测。

参考文献 (References)

- [1] Volpe J A. Vulnerability assessment of the transportation infrastructure relying on the global positioning system [R]. National Transportation Center, 2001.
- [2] Scott L. Anti-spoofing & authenticated signal architectures for civil navigation systems [C]//Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2003.
- [3] Samana N. Global positioning : technologies and performance [M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc, 2008.
- [4] Barton D K. Modern radar system analysis [M]. Norwood, MA, USA: Artech House Inc, 1988.
- [5] Interface specification IS - GPS - 200 revision E [R]. Global Positioning Systems Wing, 2010.
- [6] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2006.
- [7] Kou Y H, Zhang H T. Verification testing of a multi-GNSS RF signal simulator [C]//Proceedings of Inside GNSS, 2011.