

惯导辅助的三元天线阵欺骗干扰检测算法*

范广腾, 黄仰博, 伍 微, 朱祥维, 孙广富
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:对欺骗信号的到达角检测是目前最有效的欺骗检测方法之一,常用的到达角检测又分为载波相位单差和载波相位双差检测。载波相位单差检测技术不能应用于运动载体,载波相位双差技术对多阵元发射的欺骗信号或单路欺骗信号失效。针对该问题,提出一种惯导辅助的三元天线阵欺骗干扰检测技术,该算法主要应用于车辆运动载体,运动载体只需在某一时间段内运动一段距离即可利用该算法进行欺骗干扰检测。该算法对多阵元发射的欺骗信号或单路欺骗信号都同样有效。通过理论分析和仿真实验验证了所提方法的有效性,并得出天线阵基线长度越长,运动位移越大、欺骗源距离接收天线越近,信号入射方向与天线位移方向夹角越接近 90° ,该方法检测性能越优的结论。

关键词:欺骗检测;载波相位差;惯导辅助;三元天线阵;运动载体

中图分类号:TN914.42 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)02-091-05

Detection of spoofing threats by inertial assisted three elements antenna

FAN Guangteng, HUANG Yangbo, WU Wei, ZHU Xiangwei, SUN Guangfu

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

Abstract: DOA (direction-of-arrival) discrimination is one of the most effective spoofing detection methods. There are two forms of DOA, one is the carrier phase single difference and the other is the carrier phase double difference. However, the carrier phase single difference cannot be used in the motion vector, and the carrier phase double difference will be ineffective in detecting single spoofing signal or multi-elements spoofing transmitter. In order to solve this problem, a method based on the inertial assisted three elements antenna was introduced. This method was applied to motion vectors, the motion vectors using this method can detect the spoofing only by means of moving a distance during a certain time. This method not only can be effective for several spoofing signals from the same antenna, but also can detect single spoofing signal or multi-elements spoofing transmitter with strong ability. The proposed spoofing detection method was verified to be effective through theoretical analyses and simulation tests. The results indicate that the longer the displacement distance of the receiver antenna is, the better the spoofing detection performance of the proposed method is; the closer to spoofer from the receiver antenna is, the better the spoofing detection performance of the proposed method is; the more vertical between DOA and antenna displacement direction is, the better the spoofing detection performance of the proposed method is.

Key words: spoofing detection; carrier phase difference; inertial assisted; three elements antenna; motion vector

通过接收机的多个天线阵元对接收信号进行到达角检测是目前最为有效的欺骗干扰检测方法之一^[1-3]。该技术又分为载波相位单差检测技术和载波相位双差检测技术。载波相位单差检测技术最大的缺点为无法应用于运动载体^[4-5]。载波相位双差检测技术利用接收机接收到的任意两路信号载波相位差是否相等作为判决依据^[6]。该方法虽然解决了运动载体欺骗干扰检测问题,但其有如下三个缺点:①只能检测出基于接收信号转发与单天线的产生式欺骗干扰,对基于接收信

号转发与多天线产生式欺骗干扰失效;②该方法是基于对两路接收信号的载波相位差进行两两判决,从而找到欺骗信号,因此需要遍历所有信号组合,检测所需时间长,并且需要跟踪所有输入信号;③对于单路欺骗信号的情况,该方法将失效,而尽管单路欺骗信号不能实现对目标接收机的诱导,但其依然可以造成目标定位出现较大误差,因此在实际导航对抗中必须考虑。

针对上述问题,本文提出一种惯导辅助的时间维载波相位双差欺骗干扰检测技术。该算法主

* 收稿日期:2015-09-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61403413)

作者简介:范广腾(1988—),男,安徽宣城人,博士研究生,E-mail:fanguangteng@163.com;

孙广富(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:sunguangfu_nnc@163.com

要应用于车辆运动载体,运动载体只需在某一段时间内运动一段距离即可利用该算法进行欺骗干扰检测。该算法利用了真实信号和欺骗信号到天线阵距离上的差异,通过天线阵运动情况下真实信号与欺骗信号的载波相位变化特性的不同,对两者进行区分。该算法有如下四方面优点:①该算法适用于运动载体;②当欺骗源采用多天线进行欺骗信号发射时,依然可以有效地对欺骗信号进行检测;③采用该算法的接收机只需同时跟踪一路信号即可进行欺骗干扰的检测;④对接收信号中只有单路欺骗信号的场景可以有效检测。

1 三元天线阵时间维载波相位双差模型

所提三元天线阵其阵型须为非线阵。为方便分析,以正三角形天线阵为例,设天线阵基线长度为 b ,下面分别介绍接收真实信号和欺骗信号的时间维载波相位双差模型。

1.1 三元天线阵接收真实信号的时间维载波相位双差模型

以三元阵起始时刻平面为 X 轴和 Y 轴所在平面, A_0 为原点建立直角坐标系。 A_0B_0 基线方向为 X 轴方向, Z 轴指向天顶方向, XYZ 轴满足右手定则,如图 1 所示。

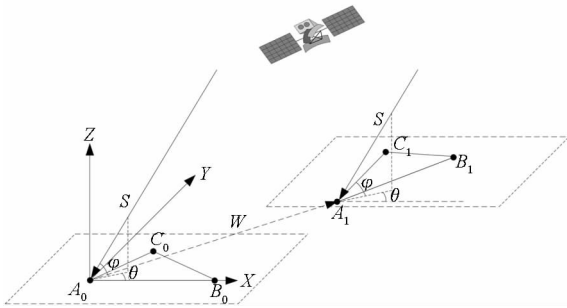


图 1 三元天线阵与真实入射信号的角度关系

Fig. 1 Angle relationship between three elements antenna and authentic signal

入射信号 S 在坐标系下的单位方向矢量表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{S} &= [x_s, y_s, z_s]^T \\ &= [-\cos\varphi\cos\theta, -\cos\varphi\sin\theta, -\sin\varphi]^T \end{aligned} \quad (1)$$

三元阵的坐标分别为 $\mathbf{A}_0 = [0, 0, 0]$, $\mathbf{B}_0 = [b, 0, 0]$ 和 $\mathbf{C}_0 = [b\cos\varphi\cos\theta, b\cos\varphi\sin\theta, 0]$, 相应阵元间基线方向矢量分别为 $\mathbf{b}_{A_0B_0}$ 、 $\mathbf{b}_{A_0C_0}$ 和 $\mathbf{b}_{B_0C_0}$, 对应的载波相位差分别为 $\phi_{A_0B_0}$ 、 $\phi_{A_0C_0}$ 和 $\phi_{B_0C_0}$ 。由于 $\mathbf{b}_{B_0C_0}$ 和 $\phi_{B_0C_0}$ 可由 $\mathbf{b}_{A_0B_0}$ 、 $\mathbf{b}_{A_0C_0}$ 和 $\phi_{A_0B_0}$ 、 $\phi_{A_0C_0}$ 得到, 对下文的欺骗干扰检测没有贡献, 因此在本文中不需要单独讨论。

对应的载波相位差满足如下方程组:

$$\begin{cases} \phi_{A_0B_0} = b\cos\varphi\cos\theta + \gamma_{A_0B_0} \\ \phi_{A_0C_0} = \frac{1}{2}b\cos\varphi\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}b\cos\varphi\sin\theta + \gamma_{A_0C_0} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\gamma_{A_0B_0}$ 和 $\gamma_{A_0C_0}$ 为载波相位差测量值的测量噪声。定义载波相位双差 ϕ_{dif_0} 为:

$$\phi_{\text{dif}_0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\phi_{A_0C_0} - \frac{1}{2}\phi_{A_0B_0} \right) = b\cos\varphi\sin\theta + \gamma_{\text{dif}_0} \quad (3)$$

假设载波相位在 A_0 、 B_0 、 C_0 点的测量误差均是零均值方差为 σ^2 的相互独立的高斯白噪声, 则 $\gamma_{A_0B_0}$ 、 $\gamma_{A_0C_0}$ 和 γ_{dif_0} 也都是零均值的高斯白噪声, 且方差均为 $2\sigma^2$ 。将式(2)和式(3)写成矩阵形式为:

$$\Phi_0 = b\mathbf{A} + \boldsymbol{\gamma}_0 \quad (4)$$

式中,

$$\begin{cases} \Phi_0 = \begin{bmatrix} \phi_{A_0B_0} \\ \phi_{\text{dif}_0} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\gamma}_0 = \begin{bmatrix} \gamma_{A_0B_0} \\ \gamma_{\text{dif}_0} \end{bmatrix} \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\theta \\ \cos\varphi\sin\theta \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

天线阵经过 Δt 的时间运动至 $A_1B_1C_1$, 其运动可以分解为平动向量 \mathbf{W} 和旋转向量 \mathbf{Y} 。对于陆地上的车载导航系统来说, 因为路面的前后坡度和左右倾度经常很小而且变化缓慢, 因此只考虑天线阵方位角的变化, 即:

$$\begin{cases} \mathbf{W} = [w_x, w_y, w_z]^T \\ \mathbf{Y} = [0, 0, \alpha]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中, 平动向量 \mathbf{W} 指从 A_0 指向 A_1 的向量, 旋转向量 \mathbf{Y} 指天线 A 阵元经过平动向量 \mathbf{W} 由 A_0 运动到 A_1 后, 天线阵绕 Z 轴旋转 α 后到 $A_1B_1C_1$ 的向量, 旋转角 α 可由惯导测量得到。

由于天线运动的位移距离远小于真实卫星与天线阵的距离, 因此可以认为真实信号在 $A_1B_1C_1$ 的入射方向保持不变。则天线阵在 $A_1B_1C_1$ 的载波相位差的矩阵形式为:

$$\Phi_1 = b\mathbf{A}\mathbf{A} + \boldsymbol{\gamma}_1 \quad (7)$$

其中 \mathbf{A} 为 2×2 的旋转矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.2 天线阵接收欺骗信号的载波相位差模型

由于欺骗源与天线阵距离较近, 因此欺骗信号在 $A_1B_1C_1$ 处的入射方向相对于 $A_0B_0C_0$ 的发生了变化, 如图 2 所示。

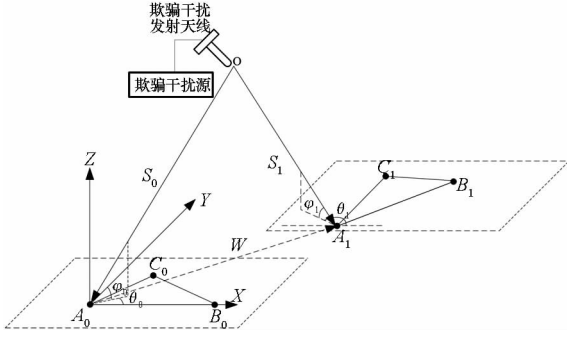


图2 三元天线阵与欺骗入射信号的角度关系

Fig. 2 Angle relationship between three elements antenna and spoofing signal

则天线阵运动前后的载波相位差分别表示为:

$$\begin{cases} \Phi_0 = b\mathbf{A}_0 + \gamma_0 \\ \Phi_1 = b\mathbf{A}_1 + \gamma_1 \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 \cos\theta_0 \\ \cos\varphi_0 \sin\theta_0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 \cos\theta_1 \\ \cos\varphi_1 \sin\theta_1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

式中, φ_0 、 θ_0 和 φ_1 、 θ_1 分别是天线阵运动前后的欺骗信号入射方向的俯仰角和方位角。

2 检测方法

由上一节可知,在天线阵运动过程中,真实信号与欺骗信号的载波相位差模型存在差异,以此构建欺骗信号检测的二元假设检验模型:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{A} = -\frac{1}{b}(\Phi_0 - \gamma_0) + \frac{1}{b}\mathbf{A}^{-1}(\Phi_1 - \gamma_1) \\ H0: \Delta\mathbf{A} = \mathbf{0} \\ H1: \Delta\mathbf{A} \neq \mathbf{0} \end{cases} \quad (11)$$

其中定义 $\Delta\mathbf{A}$ 为时间维的载波相位双差,分析式(11)中的噪声项,则噪声项 γ 可以表示为:

$$\gamma = \frac{1}{b}\gamma_0 - \frac{1}{b}\mathbf{A}^{-1}\gamma_1 \quad (12)$$

易知 γ 服从 $N(\mathbf{0}, \mathbf{C})$ 分布,其中协方差矩阵 \mathbf{C} 可以表示为:

$$\mathbf{C} = \frac{4\sigma^2}{b^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

即载波相位差矢量满足如下分布:

$$\begin{cases} H0: \Delta\mathbf{A} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{C}) \\ H1: \Delta\mathbf{A} \sim N(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{C}) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\boldsymbol{\mu}$ 为天线阵接收欺骗信号情况下 $\Delta\mathbf{A}$ 的均值。由式(14)可知,载波相位差矢量分布为二维高斯分布,因此难以直接得到不同假设条件下的

概率分布。

由式(14)构造高斯随机变量的二次型,有:

$$\nu = (\Delta\mathbf{A})^T \mathbf{C}^{-1} (\Delta\mathbf{A}) \quad (15)$$

当输入信号为真实信号时, ν 服从自由度为2的中心 χ^2 分布;当输入信号为欺骗信号时, ν 服从自由度为2的非中心 $\chi'^2(\lambda)$ 分布。其中:

$$\lambda = \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\mu} \quad (16)$$

则二元假设检测的判决依据为: $\nu < \rho_{th}$ 则判为 $H0$; $\nu > \rho_{th}$ 则判为 $H1$ 。其中 ρ_{th} 为判决门限。

3 检测性能分析

由上一节可知,该检测方法的性能与 λ 有关, λ 越大两种假设条件下的概率密度分布函数相隔越远,其检测性能也越优。由式(16)可得:

$$\lambda = \frac{b^2}{4\sigma^2} [(\cos\varphi_1 \cos\theta_1 - \cos\varphi_0 \cos\theta_0)^2 + (\cos\varphi_1 \sin\theta_1 - \cos\varphi_0 \sin\theta_0)^2] \quad (17)$$

令载波相位测量精度 σ 为已知,分析式(17)可得, λ 的大小与天线阵边长 b 和欺骗信号在天线阵运动前后的入射角有关。

3.1 天线阵基线长度对检测性能的影响

令载波波长为 ξ , 天线阵基线长度 b 为载波波长的整数倍,接收机单路信号载波测量精度为典型 GPS C/A 码接收机所能达到的 $\sigma = 0.01\xi^{[7]}$ 。由此可以求解得到 \mathbf{C} 和 \mathbf{C}^{-1} 的值。

通过式(17)可以看出,增大天线阵边长 b 可以提高检测性能。

假设欺骗信号在天线阵运动前后的方位角/俯仰角分别为 $(80^\circ, 50^\circ)$ 和 $(82^\circ, 51^\circ)$, 可以得到不同天线阵基线长度下欺骗信号二元假设检验的 ROC 曲线,如图3所示。

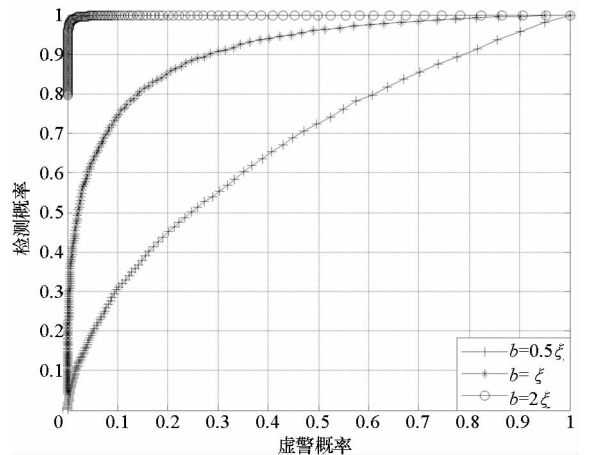


图3 不同天线阵基线长度的 ROC 曲线

Fig. 3 ROC curve of different baseline of the array

由图3可见,在给定欺骗入射信号到达角情

况下,天线阵基线长度的增加明显提升了检测性能。

3.2 欺骗源和天线阵运动前后的相对位置对检测性能的影响

以上分析的 ROC 曲线是在给定欺骗信号入射角时的检测性能。由式(17)可以看出,其检测性能与欺骗信号在天线阵运动前后的入射角有关。而欺骗信号在运动前后的入射角又取决于欺骗源和天线阵运动前后的相对位置。

由于影响欺骗源和天线阵运动前后相对位置的因素较多,故本文首先固定欺骗源和天线阵起始位置以分析天线阵运动方向和距离对检测性能的影响,再固定天线阵运动方向和距离以分析欺骗源处于不同位置对检测性能的影响。

图 4 给出了欺骗信号在天线阵运动前入射信号的俯仰角与方位角均为 45° 、欺骗源距离为 1000 m、天线阵边长为 2ξ 、虚警概率为 1% 时,不同运动距离条件下,天线阵运动方向与欺骗干扰检测概率的关系。

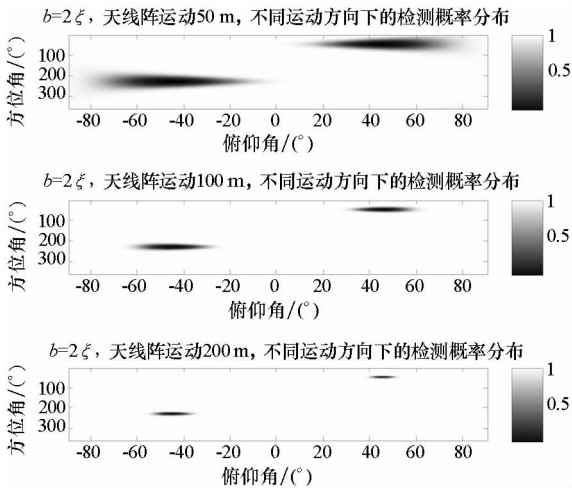


图 4 不同运动距离下,天线阵运动方向与欺骗干扰检测概率的关系

Fig. 4 Relationship between detection probability and direction of motion for different movement distance

图 5 给出了天线阵运动方向的俯仰角与方位角均为 45° 、运动距离为 200 m、天线阵边长为 2ξ 、虚警概率为 1% 时,不同欺骗源距离条件下,欺骗源不同方位与欺骗干扰检测概率的关系。

由图 4、图 5 可以得出如下三点结论:

- 1) 天线阵运动距离越远,欺骗干扰检测性能越优。
- 2) 欺骗源离天线阵距离越近,欺骗干扰检测性能越优。
- 3) 天线运动方向与欺骗源入射方向夹角越

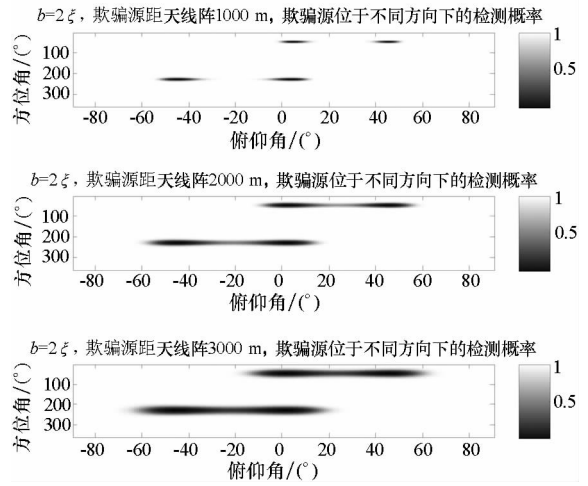


图 5 不同欺骗源到天线阵的距离下,欺骗源位于不同方位下的检测概率

Fig. 5 Relationship between detection probability and direction of spoofer for different distance from spoofer to receiver

接近 90° ,欺骗干扰检测性能越优。

由上述结论可知,基于惯导辅助的三元天线阵欺骗干扰检测算法适用于高速运动的载体,并且对周边的欺骗干扰源具有很强的检测能力。

4 仿真分析

4.1 仿真条件

以 GPS Sat - 2 L1C/A 信号为例,仿真实验条件设置如下:

1) 仿真开始时间为 2014 年 12 月 30 日 23 时 56 分 40 秒,此时 Sat - 2 在地心地固直角坐标系中的坐标为 (9 192 102.9 m, 20 358 246.1 m, 15 053 036.5 m),在天线阵运动期间,卫星位置变化很小,可以忽略不计。

2) 天线阵在地球表面运动,其运动轨迹如下:

- ① 起始时刻 t_0 的坐标为 R_0 (2992.9 km, 2095.7 km, 5128 km);
- ② t_1 时刻的坐标为 R_1 (2992.93 km, 2095.67 km, 5128 km);
- ③ t_2 时刻的坐标为 R_2 (2992.97 km, 2095.63 km, 5128 km);
- ④ t_3 时刻的坐标为 R_3 (2993.01 km, 2095.6 km, 5128 km);
- ⑤ t_4 时刻的坐标为 R_4 (2993.05 km, 2095.58 km, 5128 km);
- ⑥ t_5 时刻的坐标为 R_5 (2993.09 km, 2095.55 km, 5128 km);

3) 欺骗源坐标位置为 O (2993.7 km, 2094.2 km, 5128.7 km)。

4) 天线阵基线长度 b 为 2 倍的载波波长, 即 $b = 2\xi$, 载波测量精度为 $\sigma = 0.01\xi$ 。

5) 进行 10 000 次蒙特卡洛仿真。

4.2 仿真结果

仿真结果如图 6、图 7 所示。

由图 6 可以看出随着天线阵位移距离的增大, 接收真实信号的检测量 λ 基本不变(基本为零), 但接收欺骗信号的检测量 λ 逐渐增大。该仿真结果证明了该欺骗检测模型的有效性。

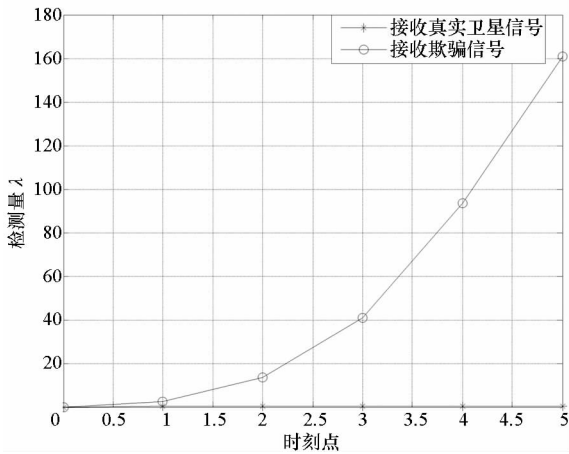


图 6 天线阵接收真实信号和欺骗信号, 不同时刻检测量 λ 的变化

Fig. 6 Variation of λ at different time for authentic and spoofing signal

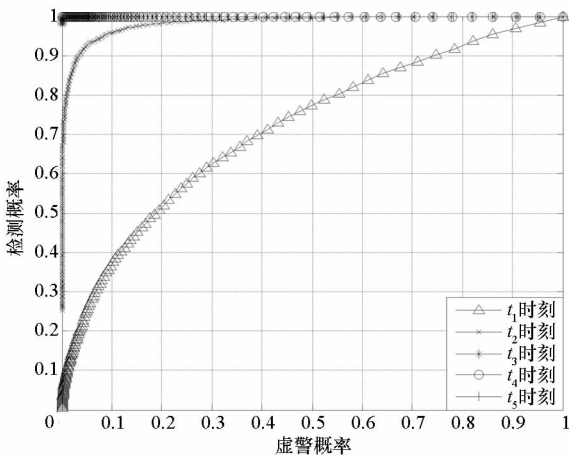


图 7 天线阵不同时刻的欺骗干扰检测 ROC 曲线

Fig. 7 ROC curves of spoofing threats detection at different time

图 7 中 t_3 时刻以后, 欺骗干扰检测的 ROC 曲线基本都为 1。由此可知随着天线阵运动位移的增加, 欺骗干扰检测性能也会随之提高, 但是其性能的提高是以牺牲欺骗干扰检测时间为代价

的, 在实际工程应用中需要折中考虑。相比于传统的载波相位单差和双差检测技术, 惯导辅助的三元天线阵欺骗干扰的检测性能可以实时调整, 对于欺骗干扰源较远的欺骗信号, 可以增加检测时间来提高检测能力, 而对于欺骗干扰源较近的欺骗信号, 可以减少检测时间以降低反应时间, 因此该方法更加灵活。

5 结论

针对前后坡度和左右倾度变化较小的车载导航接收机, 提出一种惯导辅助的三元天线阵欺骗干扰检测算法。该算法通过欺骗源与真实卫星到天线阵距离上的差异来进行区分。理论分析和仿真实验结果表明, 当天线阵基线长度为 2 倍的载波波长、天线阵运动距离大于 200 m 时, 即可实现对天线阵周边 2 km 范围内 95% 以上区域的欺骗源所发射欺骗干扰的有效检测。

参考文献 (References)

- [1] Montgomery P Y, Humphreys T E, Ledvina B M. Receiver-autonomous spoofing detection; experimental results of a multi-antenna receiver defense against a portable civil GPS spoofer [C]//Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2009: 124-130.
- [2] Montgomery P Y, Humphreys T E, Ledvina B M. A multi-antenna defense; receiver-autonomous GPS spoofing detection [J]. Inside GNSS, 2009, 4(2): 40-46.
- [3] McDowell C E. GPS spoofer and repeater mitigation system using digital spatial nulling: US7250903 [P]. 2007-07-31.
- [4] 张鑫. 卫星导航欺骗干扰信号仿真与检测关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
ZHANG Xin. Research on key technologies of satellite navigation spoofing signal simulation and spoofing detection [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [5] 黄龙, 唐小妹, 王飞雪. 卫星导航接收机抗欺骗干扰方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(11): 1344-1347.
HUANG Long, TANG Xiaomei, WANG Feixue. Anti-spoofing techniques for GNSS receiver [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(11): 1344-1347. (in Chinese)
- [6] Daneshmand S, Jafarnia-Jahromi A, Broumandon A, et al. A low-complexity GPS anti-spoofing method using a multi-antenna array [C]//Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2012: 1233-1243.
- [7] 黄龙. GNSS 接收机欺骗与抗欺骗关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
HUANG Long. Study on techniques of receiver spoofing and anti-spoofing for global navigation satellite system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)