

基于导航定位服务性能的 GNSS 天线阵 抗干扰统计性能评估方法*

聂俊伟,葛锐,李垣陵,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:基于可用率指标的天线阵统计性能评估方法已成为 GNSS 天线阵性能评估的共识,但在指标体系及具体细节上,传统的评估方法尚存在不足之处。一是对信号作独立均匀入射的假设,与实际星座特性相差较大,二是单信号可用率指标尚无法满足 GNSS 接收机对导航定位的需求。针对这两方面的问题,提出了可定位概率、服务可用性等与接收机导航定位服务性能相关联的新指标。结合实际导航卫星星座的分析验证了新指标的有效性。

关键词:卫星导航; 抗干扰天线阵; 性能评估; 服务性能

中图分类号: TN921.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)02-0081-07

Performance evaluation method for GNSS anti-jam antenna arrays based on the navigation service performance

NIE Junwei, GE Rui, LI Yuanling, WANG Feixue

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

Abstract: Statistical performance evaluation based on available ratio of antijam antenna array has been considered a common viewpoint for GNSS evaluation. But in some aspects, the traditional evaluation method has several deficiencies as follows: the first is the hypothesis of independent uniform distribution of signal DOA, which is not in accordance with the navigation constellation; the second is the single signal available ratio which is unable to meet the navigation requirements. Aiming at these two problems, the research extended the average available ratio of single signal to the average solution probability and navigation service availability which are associated with the navigation solution performance. Finally, the new index was validated by a simulation under the COMPASS navigation constellation.

Key words: GNSS; anti-jam array; performance evaluation; service performance

GNSS 天线阵抗干扰性能评估是准确衡量接收机在导航战强对抗环境中生存能力的基础,也是进一步提升抗干扰接收机性能的前提。因此,性能评估在天线阵抗干扰接收机技术与产品开发中均具有举足轻重的作用。

特定场景下的性能评估结果仅能反应接收机的局部性能,已逐步被统计性能指标所代替。Hinshilwood^[1]采用类似于可用率的覆盖率为指标,评估多波束天线在随机的干扰布局下的抗干扰性能,并统计得到了覆盖率的分布。Fante^[2]以卫星可用率为指标,随机产生信号和干扰的方向,评估 GPS 自适应阵的抗干扰性能,并在文献[2]中采用平均信噪比损耗为性能指标,评估了空域-时域-极化域联合抗干扰的性能。在总结文献[3-5]的基础上,文献[6]中提出了可用率的统一理论框架,为天线阵统计性能的评估奠定了理

论基础,确立了天线阵抗干扰性能评估的基本方向。但在具体问题上,还存在较多需要修订与改进的环节,主要体现在如下几个方面:

(1)停留在单信号可用率,无法满足导航接收机定位需求。文献[7]对干扰条件下的定位进行了初步分析,但并未给出严格的数学定义。

(2)对多信号同时接收的问题,进行了贝努利假设,未考虑有用信号在空间上的相关性。

1 奇异点现象及可用率指标

1.1 奇异点现象

在给定的阵型及抗干扰处理算法之后,抗干扰性能与信号干扰来波方向密切相关。不同场景下,存在将干扰彻底抑制的同时信号获得较大增益的情况,但与此同时也存在抑制干扰同时信号有较大损耗的情况。这就是特定信号干扰场景下

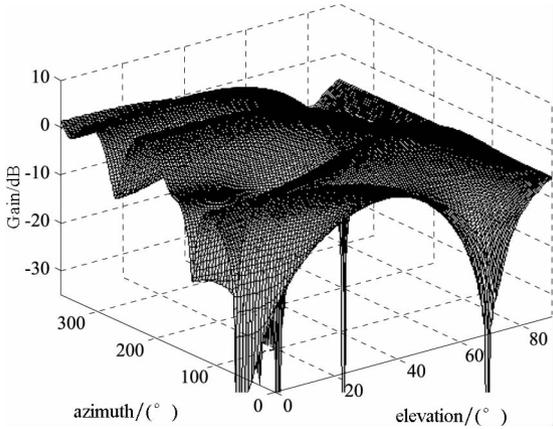
* 收稿日期:2011-11-28

作者简介:聂俊伟(1983—),男,山西原平人,博士研究生,E-mail:njw1004@126.com;

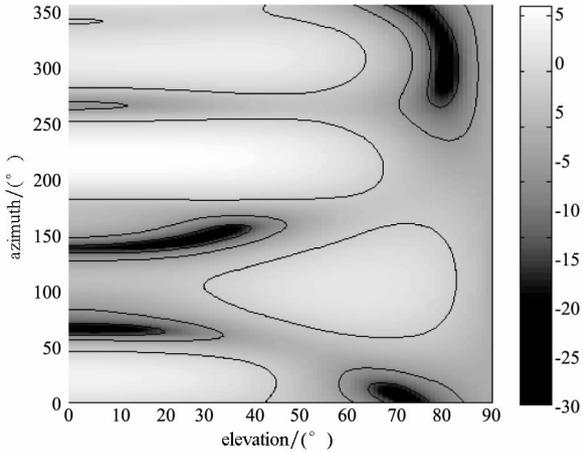
王飞雪(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:wangfeixue365@sina.com

天线阵抗干扰的奇异点现象。下面给出奇异点的一个典型范例。

在 4 阵元 3 干扰条件下,阵列处理最大可获得 6dB 增益。设置信号入射方向为方位角 222°、仰角 5°,即(222,5),分别设置三个干扰入射方向为(5,70)、(150,30)、(300,80),干信比 70dBc,根据 MVDR 准则得到权值后,计算各个方向的等效阵列增益。结果如图 1 所示。



(a) 三维方向图



(b) 灰度方向图

图 1 最优权值下等效阵列增益(单位 dB)

Fig. 1 The equivalent array gain of optimum weights

可见在抑制干扰的同时,信号方向也获得了接近 6dB 的增益。而同样是 4 阵元,仅设置 2 个干扰时,就可能使得信号损耗非常严重。图 2 给出了某些特定信号干扰场景下的等效阵列增益的等高线图。导航信号入射方向仍然为(222,5),干扰 1 的方位角为 311°,干扰 2 的方位角为 99°,两个干扰的仰角 0~90°可调。遍历两个干扰的仰角,采用 MVDR 准则计算权值和等效阵列增益,可得等效阵列增益的等高线图,图中每一点都表示一个信号干扰布局,该点灰度值则对应等效阵列增益大小^[6]。

从图 2 中可以看出,等效阵列增益与信号干扰布局的关系存在奇异点,信号来波方向为(222,5),干扰来波方向为(311,60),(99,30),奇异点处的信号与两个干扰的夹角都较大,而其等效阵列增益却远小于其他干扰布局。奇异点的存在说明了多个干扰的空间相关性以及阵列流形的复杂性,因此,简单采用特定场景下等效阵列增益指标难以全面反映阵列性能,而必须采用描述接收机可工作概率的可用率指标。

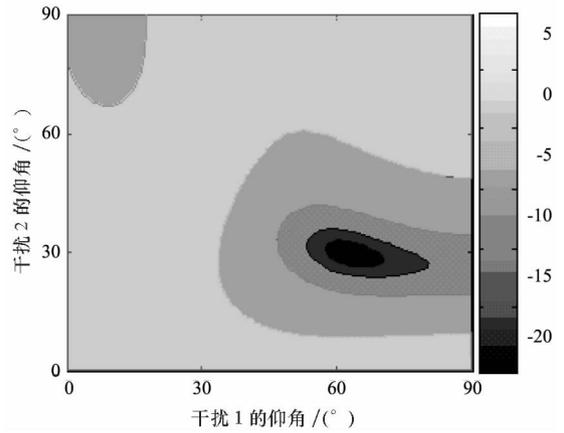


图 2 某些特定的信号干扰场景下的等效阵列增益

Fig. 2 The equivalent array gain of given signal & jammer scenarios

1.2 可用率指标体系

1.2.1 阵列增益、可用函数与可用率

文献中[6]首先引入了与干扰环境中接收机工作能力紧密相关的两个概念:阵列增益和工作门限。根据阵列增益与工作门限来衡量接收机在干扰条件下是否可用。即对于某一具体的阵列,可用函数 C 可定义为

$$C = u(G_e - M_u) \tag{1}$$

其中, G_e 为等效阵列增益, M_u 为工作门限, $u(\cdot)$ 为单位阶跃函数, C 为 0 表示不能工作, C 为 1 表示能工作。

1.2.2 天线阵抗干扰接收机的可用率^[6]

天线阵抗干扰接收机的可用率,就是在各种信号干扰环境中接收机能够工作的概率。信号、干扰可能来自各个方向,因此可认为信号和干扰方向是随机变量,从而可用函数 C 也是随机变量。可用率的数学解释就是各种信号干扰方向条件下可用函数 C 取值为 1 的概率,也就是各种条件下可用函数的数学期望。具体而言,包括平均可用率、干扰方向条件可用率、信号方向条件可用率三种形式。

(1) 平均可用率

将信号、干扰的方向都当作随机变量,平均可

用率定义为

$$\bar{C} = E[C] \quad (2)$$

可用函数 C 服从(0-1)分布,其均值是1发生的概率,所以平均可用率的物理概念为:根据某种概率分布随机设置信号和干扰方向,接收机可正常工作的概率。

(2) 干扰方向条件可用率

将信号方向当作随机变量,给定干扰方向条件下的可用率为

$$\bar{C}_J = E[C | \theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2, \dots, \theta_J, \varphi_J] \quad (3)$$

式中, (θ_n, φ_n) ($n = 1, 2 \dots, J$) 为各个干扰方向。

(3) 信号方向条件可用率

将干扰方向当作随机变量,给定信号方向条件下的可用率为

$$\bar{C}_S = E[C | \theta_0, \varphi_0] \quad (4)$$

式中, (θ_0, φ_0) 为信号方向。

1.2.3 卫星导航天线阵抗干扰接收机的可用率

根据文献[6]中的描述,对其接收机可定位概率计算方法总结如下:

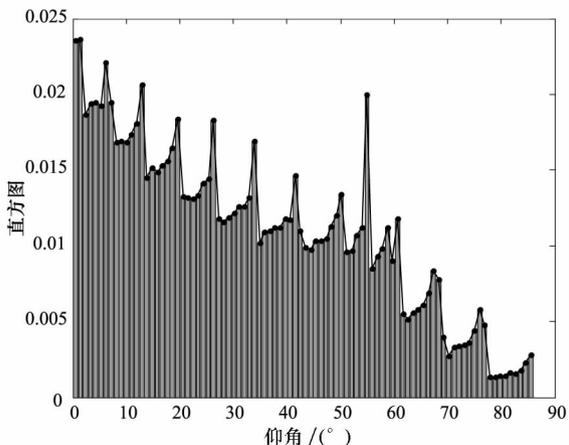
- (1) 估计无干扰时的可视卫星数 N_s ;
- (2) 确定单信号的平均可用率 C_s ;
- (3) 根据贝努利假设计算 4 颗以上卫星可用的概率 $P(N_s \geq 4)$:

$$P(N_{s_j} \geq 4) = \sum_{i=4}^{N_s} C_{N_s}^i (C_s)^i (1 - C_s)^{N_s-i} \quad (5)$$

文献[7-8]中,采用下式计算 N_s 个卫星同时可用的概率。

$$P(N_s) = \int d\varphi P_\varphi(\varphi) \sum_{N_I=0}^{\infty} P(N_s | \varphi, N_I) P_I(N_I) \quad (6)$$

其中, $P_\varphi(\varphi)$ 为接收机概率密度函数;



(a) 仰角分布

$P_I(N_I)$ 为存在 N_I 个干扰的概率; $P(N_s | \varphi, N_I)$ 为存在 N_I 个干扰,接收机位于 φ 时的条件概率。

文献中并未给出上述参数的确定方法,仅给出了几组特定值,具体的技术细节不得而知。下文分析将以第一种方法为优化基础。

2 传统评估方法的不足

文献[6]中,对信号来波方向做了独立均匀分布的假设。在此假设下,分析接收阵列的平均可用率指标。信号入射仰角、方位角的概率密度函数为:

$$\begin{cases} f_A(\alpha) = 2^{-1} \cos \alpha & 0 \leq \alpha \leq \pi/2 \\ f_B(\beta) = \pi^{-1} & 0 \leq \beta \leq \pi \end{cases} \quad (7)$$

即仰角呈余弦函数变化,方位角为均匀分布。实际星座条件下,由星座构型所决定,上述假设不一定成立,在此对这一问题进行分析。

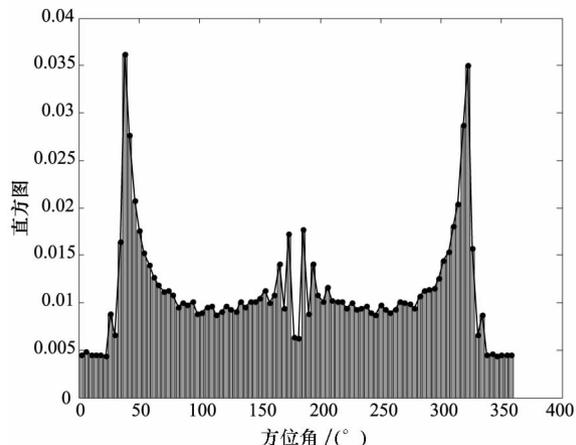
2.1 信号均匀分布假设的不足

对实际星座进行数值计算,分析实际情况与式(7)假设的差异。结合实际应用背景,分如下两种情况进行分析:

(1) 给定用户位置,对时间进行统计平均。典型情况为监测接收机所面临的情形。

(2) 用户位置遍历全球,对时间、空间两维参数进行统计。典型应用为巡航导弹等武器平台,其使用时间、使用地点都是不确定的。

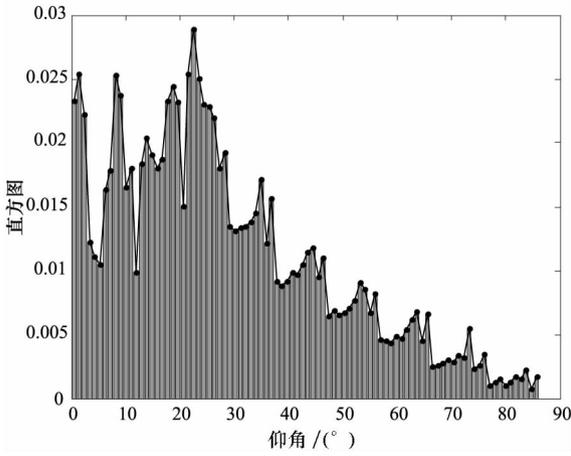
对于第一种情况,以 GALILEO 星座为例,分别取长沙某一地点、赤道上某一位置,时间上每隔 1min 进行一次取样,计算所有可视卫星的仰角、方位角,时间跨度 24h。然后对仰角、方位角进行直方图统计,得到如图 3、图 4 所示结果。



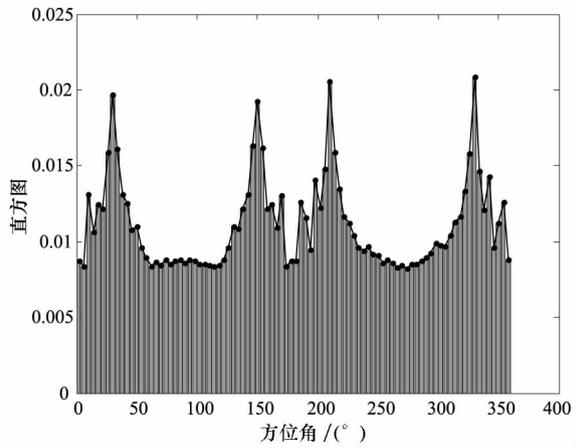
(b) 方位角分布

图3 长沙某位置卫星信号来波方向分布情况

Fig. 3 The distribution of DOA of satellite signal at Changsha



(a) 仰角分布



(b) 方位角分布

图 4 赤道上某位置卫星信号来波方向分布情况

Fig. 4 The distribution of DOA of satellite signal at equator

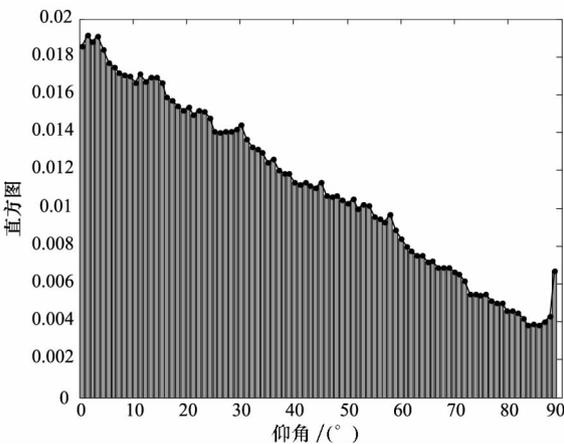
对于固定位置,信号来波方向对时间进行统计,可得如下结论:

(1)对于仰角,总体上呈下降趋势,但明显存在较大的起伏,与余弦函数尚有一定差异。

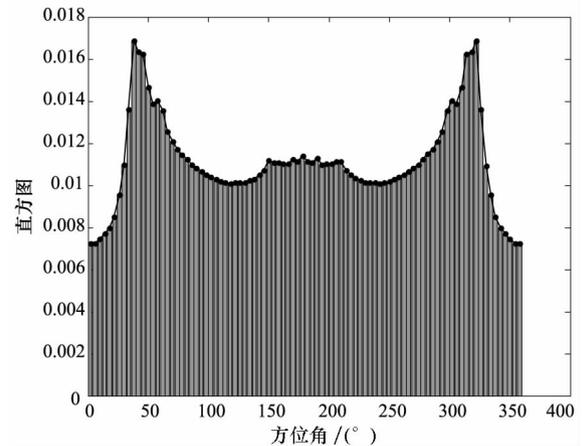
(2)对于方位角,从实际分析结果来看,与均匀分布存在较大差异。在 50°与 320°左右存在较大的峰值。

(3)对比赤道位置仰角方位角分布结果与长沙某点仰角方位角分布结果可知,接收阵列所处位置的不同,来波方向的特性变化较为剧烈。

对第二种情况,计算全球不同区域可视卫星的仰角方位角后,对时间、空间求平均。空间按照经纬度 10°间隔抽取,时间按照 1min 进行采样,得到如图 5 所示结果。



(a) 仰角分布



(b) 方位角分布

图 5 卫星信号来波方向分布情况

Fig. 5 The distribution of DOA of satellite signal

全球范围整周期内统计结果表明:(1)信号仰角近似呈线性分布。0°仰角附近来波所占比例大,仰角增大时,来波所占比例降低。90°仰角附近来波所占比例出现一局部峰值;(2)方位角呈对称特性,关于 180°对称。在 40°与 320°附近出现峰值。(3)仰角、方位角分布与均匀入射假设存在一定差异。

2.2 信号独立分布假设的不足

采用贝努利假设来分析单信号可用率与多信号可用之间的关系。事实上,由导航星座的构型所决定,各卫星之间是存在空间相关性的。尤其

是对于静态应用场合,如监测接收机,由于接收天线阵位置、姿态均保持不变,导航信号相对于阵列所在平面的入射方向完全取决于星座特性与接收机所处位置。

按照独立均匀入射进行推导,各信号之间的张角分布情况与用户位置无关,具体的分布表达式难以解析表示,采用数值计算的方式进行分析。取 3000 个场景,每个场景下假设可视卫星数为 12 颗,每颗卫星按照上半球面均匀入射随机生成来波方向,在此基础上计算两两之间的张角。对所有得到的张角进行直方图统计,得到图 6 所示结果。

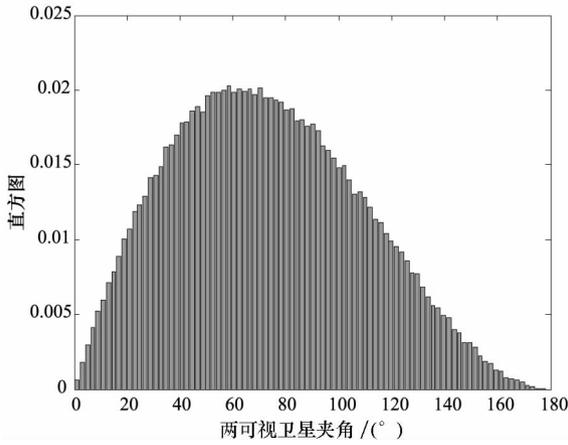
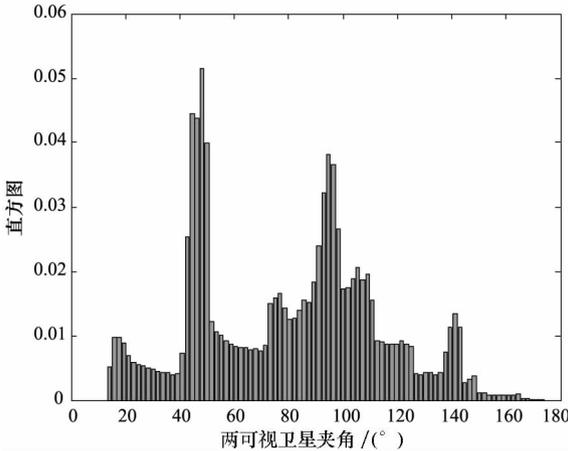


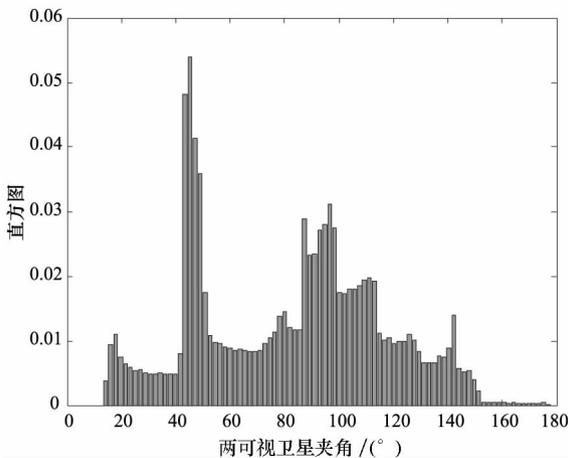
图 6 均匀独立入射假设下卫星信号来波方向空间夹角统计特性

Fig. 6 The distribution of angle between two satellite signal under independent uniform distribution

仍以 GALILEO 星座为例,分别取长沙某一地点、赤道上某一位置,每隔 1min 进行一次取样,计算所有可视卫星两两之间相对于接收机的张角,时间跨度 24h。对上述张角进行直方图统计,得到如图 7 所示结果。由此可得如下结论:



(a) 长沙某位置



(b) 赤道上某位置

图 7 可视卫星信号来波方向空间夹角统计特性分析

Fig. 7 The distribution of angle between two satellite signal

(1)实际星座背景下,卫星信号空间相关特性与用户所处位置有关;(2)实际星座背景下,卫星信号空间相关特性与独立假设条件下的空间相关特性不一致。

因此,采用均匀独立入射的假设未能反应实际星座特性,必将对阵列接收机抗干扰性能评估造成影响。在算法研究阶段,建议根据星座特性生成信号来波方向进行分析,评估天线阵性能。

3 改进的评估方法

3.1 可定位概率定义

定义可定位函数:

$$C_p = u\left(\sum_{i=1}^N C_i - 4\right) \quad (8)$$

C_p 含义是可用信号数不小于 4。 C_p 为 1 时表示可定位,为 0 时表示不可定位。

由于信号可用函数涉及信号来波方向 (θ_s, ψ_s) 、干扰来波方向 (θ_j, ψ_j) , 因此,可定位函数也与上述变量相关。进一步,得到干扰条件下的平均可定位概率函数:

$$\overline{C_p} = E(C_p) \quad (9)$$

3.2 服务可用性定义

服务可用性包含双门限,具体如下:

- 单信号可用,要求阵列处理后信号损耗小于给定门限值。
- PDOP 值满足可用性规定。要求阵列处理后接收机 PDOP 小于给定门限。

对于前者,沿用前文的定义。这里给出服务可用性函数的定义。

$$C_s = u(\text{PDOP}_i - \text{PDOP}_{th}) \quad (10)$$

其中, PDOP_i 为某一场景下的接收机 PDOP 值, PDOP_{th} 为服务可用性规定约束的 PDOP 值门限。同样,服务可用率函数也是信号来波方向 (θ_s, ψ_s) 、干扰来波方向 (θ_j, ψ_j) 的函数。进一步,得到阵列处理条件下的平均服务可用性指标:

$$\overline{C_s} = E(C_s) \quad (11)$$

3.3 仿真验证

3.3.1 可定位概率性能评估方法对比

按照传统方法,根据单信号可用率、可视卫星数及贝努利假设计算不同时刻的可定位概率。按照本文方法,直接统计抗干扰处理后可视卫星数目大于 4 的概率,以此来确定可定位概率。基于我国北斗二号二期星座特性进行数值计算。条件如下:

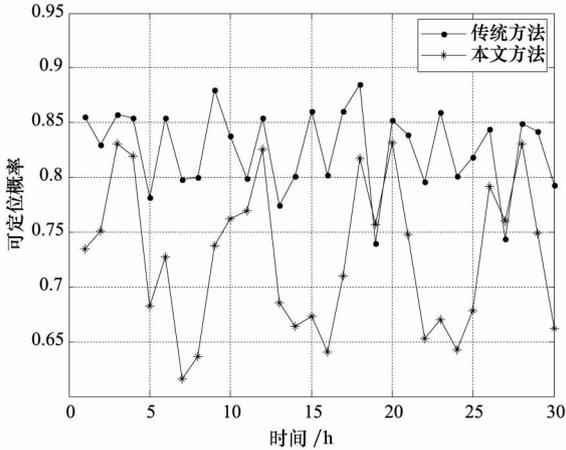
- 时间间隔 1h, 取 30 个时刻的星座计算信号来向。
- 接收机位置固定,长沙某点,天线姿态固定,三个姿态角均为零。
- 4 元中心圆阵,分别采用 MVDR 算法与 PI

算法;4 元圆阵,等效阵列增益门限为 -5dB。

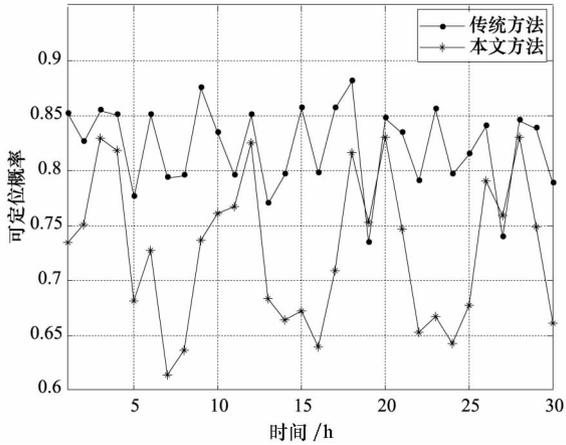
• 干扰来向服从上半球面均匀分布,3 个宽带干扰,干信比 70dBc,干扰场景数为 1000。

• 几何可视仰角门限 0°,阵元方向图仰角门限 0°。

结果如图 8 所示,根据上述分析,可得如下结论:



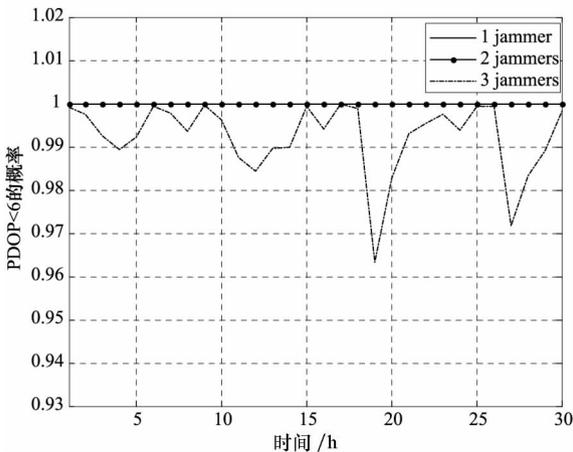
(a) MVDR 算法(70dBc)



(b) PI 算法(70dBc)

图 8 存在 3 个干扰时可定位概率

Fig. 8 The probability of navigation solution with three jammers



(a) MVDR 算法

(1) 干扰使得可视卫星数目下降,干扰信号场景不同,影响不同;(2) 传统方法较本文方法存在一定误差。依单信号可用率不同而有所变化,总体来看,单信号可用率高,则传统方法计算结果偏大,单信号可用率低,传统方法计算结果偏小。(3) 干信比 70dBc 时,抗干扰处理后可定位概率不高,可定位概率在 70% 左右。

3.3.2 干扰条件下服务可用性分析

可接收卫星数大于 4 是接收机可定位的基本要求。通常导航应用中更关注定位精度,因此对 PDOP 值提出了一定的要求。GPS 将 PDOP ≤ 6 作为服务可用性的规定^[8]。本节对干扰条件下 PDOP 值的变化作为研究对象,对比分析 PI 算法、MVDR 算法在服务可用性层次上的性能差异。基于我国北斗二号二期星座特性进行数值计算。条件如下:

• 时间间隔 1h,取 30 个时刻的星座计算信号来向。

• 接收机位置固定,长沙某点,天线姿态固定,三个姿态角均为零。

• 4 元中心圆阵,理论计算最优性能,等效阵列增益门限为 -3dB。

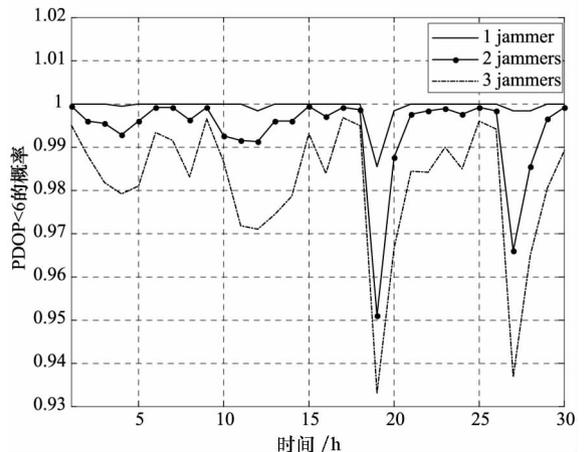
• 干扰来向服从上半球面均匀分布,干扰数目分别取 1、2、3,干信比 60dBc,干扰场景数为 5000。

• 几何可视仰角门限 0°,阵元方向图仰角门限 0°。

采用如下三个方面的参数来衡量性能:

- 不同时刻 PDOP ≤ 6 的概率曲线;
- 给定时刻对 PDOP 值的累积概率密度曲线;
- 所有时刻 PDOP 值的累积概率密度曲线。

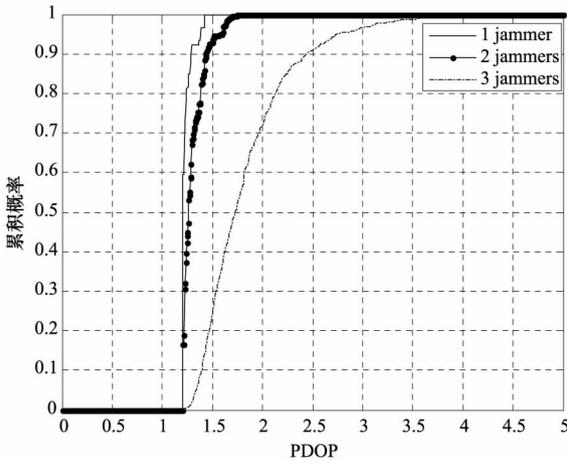
分别得到如图 9 ~ 11 所示的结果。



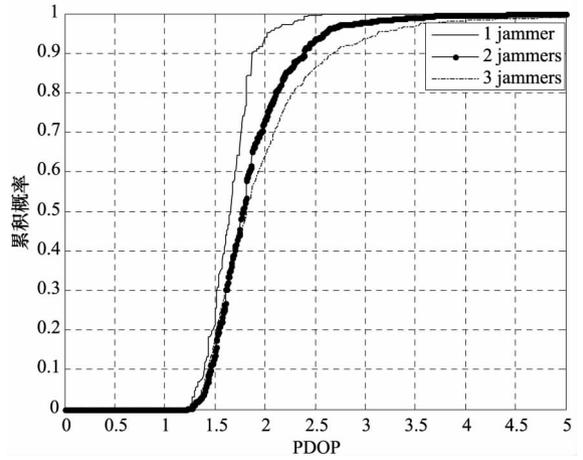
(b) PI 算法

图 9 不同时刻 PDOP 值小于 6 的概率

Fig. 9 The probability of PDOP less than 6 with different time



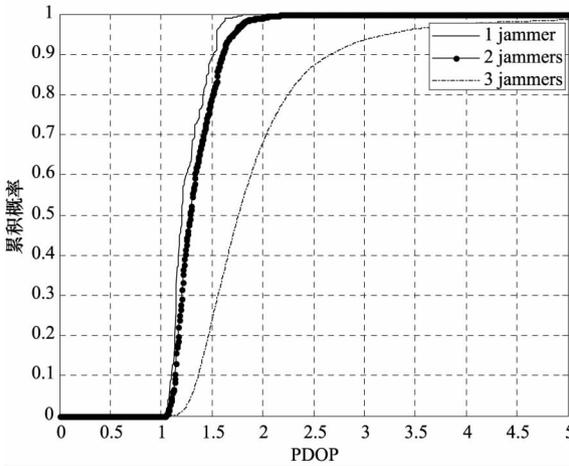
(a) MVDR 算法



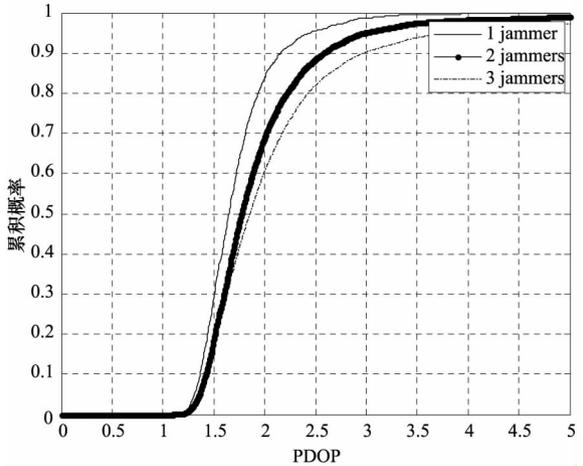
(b) PI 算法

图 10 给定时刻 PDOP 值的累积概率分布曲线

Fig. 10 The cdf of PDOP at given time



(a) MVDR 算法



(b) PI 算法

图 11 所有时刻 PDOP 值的累积概率分布曲线

Fig. 11 The cdf of PDOP

从上述仿真分析结果可得如下结论:

- (1) 干扰数越多, PDOP 值受影响越大; 3 个干扰条件下, 给定地点的 PDOP 小于 6 的概率难以达到 100%。
- (2) 无论对于给定时刻的结果, 还是所有时刻统计结果, MVDR 算法均优于 PI 算法。

4 结束语

导航定位性能是 GNSS 接收机的基本性能指标要求。天线阵接收机主要用于为车载、弹载、机载等各种作战平台提供位置信息。因此, 基于导航定位服务性能的 GNSS 天线阵统计性能评估方法将阵列抗干扰性能与导航接收机性能相关联, 直接描述了天线阵接收机在强对抗环境下的生存能力, 为天线阵抗干扰接收机的技术研究与产品开发提供了重要的技术支撑。

参考文献 (References)

[1] Hinshilwood D J. Performance measures for adaptive antenna

systems [C] // Proc of IEEE MILCOM 96, Piscataway, NJ, 1996: 1050 - 1054.

[2] Fante R L. Principles of adaptive space-time-polarization cancellation of broadband interference [R]. Bedford, MA, MITRE Corporation, 2003.

[3] Lin H C. Spatial correlations in adaptive arrays [J]. IEEE Trans. AP, 1982, 30(2): 212 - 223.

[4] Fante R L. Principles of adaptive space-time-polarization cancellation of broadband interference [C] // Proc of ION GNSS-04, Long Beach, CA, 2004: 584 - 591.

[5] Fisher N I, Embleton B J J, Lewis T. Statistical analysis of spherical data [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987: 83 - 84.

[6] 王瑛, 刘小汇, 王飞雪. 基于可用率的自适应阵抗干扰性能评估 [C] // 2007 全国天线年会, 2007: 114 - 117. WANG Ying, LIU Xiaohui, WANG Feixue. Availability ratio based evaluation of anti-jamming performance of adaptive arrays [C] // Proc of NCAnt2007, 2007. (in Chinese)

[7] Fante R L, Vaccaro J J. Ensuring GPS availability in an interference environment [C] // Proc of IEEE Position Location and Navigation Symposium, 2000: 37 - 40

[8] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd edition. Boston: Artech House, 2006: 243 - 300.