

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.01.016

一种卫星导航接收机固定多波束抗干扰方法

马衍秀¹, 马忠志¹, 李晓东¹, 杨述华²

(1. 北京遥测技术研究所, 北京 100076;
2. 火箭军装备部驻北京第二军代表室, 北京 100076)

摘要:自适应波束形成抗干扰性能受先验信息、通道幅相误差等因素影响较大,在工程应用中实现复杂,鲁棒性较差。针对这一问题,提出了一种卫星导航接收机固定多波束抗干扰方法,该方法将信号空间分为多个子空间,通过最优分配策略选取多个子空间分别实现固定波束指向,并相应地在每个波束后配置独立的卫星捕获跟踪通道组,然后依据最高信噪比准则在所有的子空间中优选卫星进行定位解算。该方法无需先验信息辅助,在抑制干扰信号的同时对卫星信号形成接收增益,在存在工程误差的实际条件下可达到与典型自适应波束形成算法相当的抗干扰性能,且具有鲁棒性强、更易工程实现等优点。最后,通过计算机仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 卫星导航接收机; 抗干扰; 阵列信号处理; 波束形成

中图分类号: V443

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2095-8110(2020)01-0104-09

The Invention Relates to a Fixed Multi-beam Forming Anti-jamming Method for Satellite Navigation Receiver

MA Yan-xiu¹, MA Zhong-zhi¹, LI Xiao-dong¹, YANG Shu-hua²

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. Second Military Representative Office in Beijing, Rocket Force Equipment Department, Beijing 100076, China)

Abstract: The anti-jamming performance of adaptive beamforming is strongly affected by prior information, amplitude and phase error of channel and so on. Thus, the implementation of engineering application is complex and the robustness is poor. In order to solve this problem, this paper proposes a fixed multi-beam forming anti-jamming method for satellite navigation receiver. This method divides the signal space into multiple subspaces, which are selected by optimal allocation strategy to achieve fixed beam pointing. And correspondingly, an independent satellite acquisition tracking channel group is configured after each beam, and then the satellites are selected and located in all spatial diversity according to the highest signal to noise ratio criterion. The method does not require prior information assistance, and forms an acceptance gain for the satellite signal while suppressing the interference signal, and has the advantages of strong robustness and easier engineering implementation. Finally, the effectiveness of the method is verified by computer simulation.

Key words: Satellite navigation receiver; Anti-jamming; Array signal processing; Beamforming

收稿日期: 2019-10-08; 修订日期: 2019-11-06

作者简介: 马衍秀(1995-), 女, 硕士, 主要从事卫星导航抗干扰方面的研究。E-mail: mayx0114@163.com

0 引言

全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 在军事、商业、民用基础设施建设中的应用越来越广泛。然而, 由于 GNSS 信号到达地球表面时的功率已十分微弱, 很容易受到各种有意或无意的电磁干扰, 从而导致接收机接收信号的信噪比下降, 定位精度降低, 甚至无法捕获跟踪定位^[1]。这也使得抗干扰技术成为了卫星导航应用领域的研究热点。

自适应天线阵列是一种有效的 GNSS 抗干扰措施^[2-4]。采用功率倒置准则的自适应调零算法已在工程实践中得到广泛应用。自适应调零无需任何先验信息辅助, 可通过自适应调整不同天线阵元的加权值在干扰方向形成零陷, 工程实现简单, 但其在抑制干扰的同时未能对卫星信号进行有效保护, 会导致卫星信号存在一定程度上的能量衰减和波形失真。为解决上述问题, 进一步提升导航接收机的抗干扰能力, 自适应波束形成算法成为了抗干扰技术中的一个重要研究方向^[5-6]。自适应波束形成不仅能够干扰方向形成零陷, 还通过在算法中施加卫星导向矢量约束形成指向卫星信号来向的高增益波束, 在抑制干扰的同时提高卫星信号信噪比, 从而对卫星信号进行有效保护。近年来, 虽然自适应波束形成算法的理论研究已较为成熟, 但其在工程实践中的应用和推广依然存在诸多问题, 主要包括: 1) 阵列天线、射频通道等硬件平台的通道幅相误差导致波束指向失配, 引起抗干扰性能下降^[7-8]; 2) 硬件平台通道幅相误差标定的复杂度高, 对标定环境的要求较为苛刻, 工程代价较大^[9-11]; 3) 依赖载体姿态、卫星来向等先验信息, 鲁棒性不高。文献^[7]分析了硬件通道幅相误差对自适应波束形成的性能影响, 指出幅相误差可导致波束不能对准卫星信号方向、使干扰零陷深度变浅、输出信干噪比 (Signal to Interference plus Noise power Ratio, SINR) 下降等问题, 需要在工程设计中对其幅相误差进行校正。文献^[10]采用了一种基于真实卫星信号数据采集后处理的方法进行幅相误差标定, 但存在标定耗时长、工程可实现性差的问题。文献^[11]提出了一种基于对称阵列单元结构设计的幅相误差标定方法, 但该方法忽略了天线阵元的安装误差和方向图不圆度, 工程中的标定效果很难保证。文献^[12]和文献^[13]提出了盲波束形成的抗干扰方

法, 但大都需要利用卫星信号的循环平稳特性或需要在干扰施加之前捕获卫星信号, 当导航接收机在强干扰环境中冷启动时, 该类方法将不能快速形成波束, 影响抗干扰性能。文献^[14]提出了一种无需先验信息的多波束抗干扰方法, 但未从理论上分析最优波束的空间分配方式。

针对自适应波束形成在工程实践中存在的问题, 本文提出了一种固定多波束形成的卫星导航天线阵抗干扰方法, 给出了工程实现架构, 分析了最优的波束空间分配方案和卫星筛选定位策略, 并通过仿真试验进行了性能验证。该方法无需先验信息辅助, 也无需进行复杂的幅相误差标定, 可在干扰环境中快速形成多个波束, 具有抗干扰性能好、鲁棒性强、易于工程实现等优点。本文安排如下: 首先介绍卫星导航天线阵自适应波束形成抗干扰的信号模型, 然后对本文所提出的固定波束形成抗干扰方法进行详细的说明, 最后进行仿真实验, 从而得出本文结论。

1 自适应波束形成抗干扰

考虑一个 M 阵元的天线阵, 假设远场有 1 个卫星信号 $s(t)$ 和 J 个互不相干的干扰信号 $j_p(t)$ ($p = 1, 2, \dots, J$) 以平面波的形式射入天线阵, 则阵列接收信号 $\mathbf{X}(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) &= \mathbf{S}(t) + \mathbf{J}(t) + \mathbf{N}(t) \\ &= \mathbf{a}_s s(t) + \sum_{p=1}^J \mathbf{a}_p j_p(t) + \mathbf{N}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S}(t)$ 、 $\mathbf{J}(t)$ 和 $\mathbf{N}(t)$ 分别为 M 维的卫星接收信号、干扰接收信号和本地噪声信号; $\mathbf{a}_s = [a_1, a_2, \dots, a_M]^T$ 为卫星信号导向矢量, 与阵元位置和卫星信号来波方向有关, 其中 $a_m = e^{-j2\pi f_0 \tau_m}$ ($m = 1, 2, \dots, M$), τ_m 为第 m 阵元接收的卫星信号与参考阵元接收的卫星信号的相对时延; 同理, \mathbf{a}_p 为干扰信号导向矢量。依据最小方差无失真响应 (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR) 准则, 如式 (2) 所示, 将卫星信号方向增益约束为 1 (单位约束), 且使得阵列的输出功率最小。

$$\begin{cases} \min_w & \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \\ \text{s. t.} & \mathbf{w}^H \mathbf{a}_s = 1 \end{cases} \quad (2)$$

由拉格朗日乘子法, 解得 MVDR 准则的最优权值矢量如式 (3) 所示

$$\mathbf{w}_{\text{MVDR}} = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}_s}{\mathbf{a}_s^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}_s} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}(t)^H]$ 为阵列接收信号

的协方差矩阵。

由式(3)可知,通过施加卫星导向矢量约束,可在抑制干扰的同时形成指向该卫星的波束,对卫星

信号形成有效保护。在工程实现中,通常采用多个并行的波束形成器分别指向不同的卫星信号,典型的自适应波束形成设计架构如图1所示。

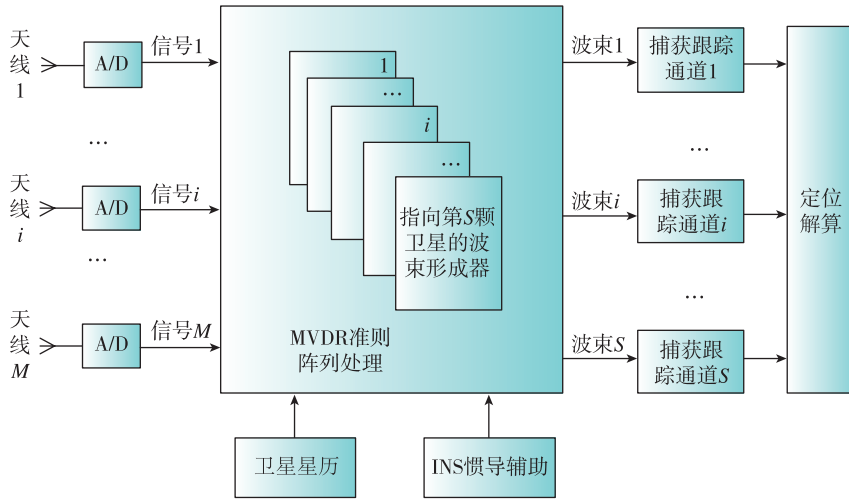


图1 自适应波束形成实现架构示意图

Fig. 1 The structure of adaptive beamforming algorithm

卫星信号和干扰信号由天线阵接收后,经变频和采样,由模/数转换模块(A/D)将模拟信号转换成数字中频信号,传递给阵列信号处理模块。阵列信号处理模块通过从外界获取卫星位置、载体姿态等先验信息,依据MVDR准则在抑制干扰的同时对每颗卫星信号形成一个波束形成器,并分配给相应的接收机通道进行捕获跟踪,获得伪码、载波相位等信息。

理论上,自适应波束形成虽然可以进一步提升卫星导航接收机的抗干扰能力,但其在具体工程设

计和应用中还存在受硬件平台幅相误差影响大、硬件标定复杂度高、依赖先验信息辅助和鲁棒性差等问题,这也进一步限制了自适应波束形成在某些平台和环境中的工程应用。

2 固定多波束抗干扰

针对自适应数字波束形成在工程实现中存在的问题,本文提出了一种固定多波束形成抗干扰方法,设计架构如图2所示。

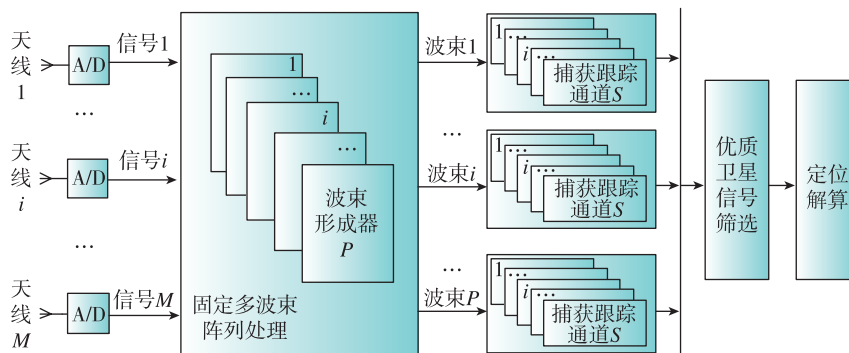


图2 固定多波束形成实现架构示意图

Fig. 2 Structure of fixed multi-beam forming algorithm

该方法的核心思想是通过将整个空域分成 P 个子空间,并指定 P 个波束形成方向,使每组权值形成的波束中的主波束指向该子空间,从而对多个卫星信号形成增益。然后通过在每个固定波束后连接捕获跟踪通道对卫星信号质量进行筛选,筛选

后的优质卫星参与定位解算,从而得到定位结果。

与典型的自适应波束形成抗干扰方法相比,固定多波束抗干扰方法不需要载体姿态和卫星信号来向等先验信息,也无需复杂的硬件误差标定,接收机在冷启动条件下也能快速形成多个波束,具有鲁棒性

强、更易工程实现等优点。以下分别描述固定多波束形成的最优波束分配方式和优质卫星筛选方法。

2.1 最优波束空间分配

最优波束空间分配主要从波束个数和波束增益覆盖范围两方面进行考虑。设定一组波束指向初值,包括波束指向个数 P 和每个波束指向对应的方位角 θ_i 和俯仰角 ϕ_i 。如果天线阵型和每个天线单元的方向图确定后,则该天线在每个方向上的波束覆盖范围是可以确定的。因此,可以根据阵列天线的阵型和各天线单元的方向图进行波束扫描仿真,确定整个天线接收空间范围内各方向对应的波束覆盖范围,从而确定波束指向个数和波束指向角度的初值。

对于阵元分布确定的天线阵列,设参考阵元的坐标为原点,第 m 个阵元的位置坐标为 $(x_m, y_m, z_m), m = 2, \dots, M$, 当该天线阵接收来向为 (θ_0, ϕ_0) 的卫星信号时,所形成的数字波束方向矢量为

$$\mathbf{a} = [1, e^{j2\pi f_0 \tau_2}, \dots, e^{j2\pi f_0 \tau_M}] \quad (4)$$

其中, τ_m 为第 m 个阵元与参考阵元接收信号之间的波程差,其解析式为

$$\tau_m = \frac{x_m \cos\phi_0 \cos\theta_0 + y_m \sin\phi_0 \cos\theta_0 + z_m \sin\theta_0}{c} \quad (5)$$

其中, c 为光速, f_0 为信号中心频率。

当天线阵中各阵元位置固定时,其静态方向图的主瓣宽度固定,由此可得该波束主瓣在方位角方向波束宽度 $\Delta\theta$ 和俯仰角方向的波束宽度 $\Delta\phi$ 。

在波束宽度 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\phi$ 确定的情况下,可以进一步确定波束个数

$$P = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\Delta\theta} \times \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{\Delta\phi} \quad (6)$$

其中: θ_{\max} 和 θ_{\min} 分别为阵列天线接收空间内的最大仰角和最小仰角; ϕ_{\max} 和 ϕ_{\min} 分别为阵列天线接收空间内的最大方位角和最小方位角。

本文以七阵元带参考节点的圆阵为例,详细介绍了最优多波束指向的确定。阵元位置分布如图 3 所示。

仿真中,将固定波束仰角设定为 $20^\circ \sim 90^\circ$, 方位角均设定为 180° 。波束的典型方向性图分别如图 4~图 6 所示,每个固定仰角的波束宽度统计如表 1 和表 2 所示。

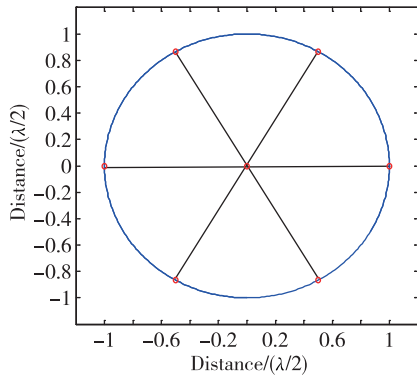


图 3 七阵元天线阵元分布示意图

Fig. 3 Location of seven-array antenna array

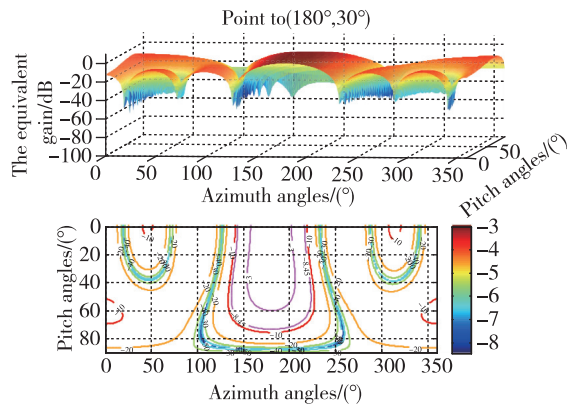


图 4 波束指向 $(180^\circ, 30^\circ)$ 的方向图

Fig. 4 Beam pattern for $(180^\circ, 30^\circ)$

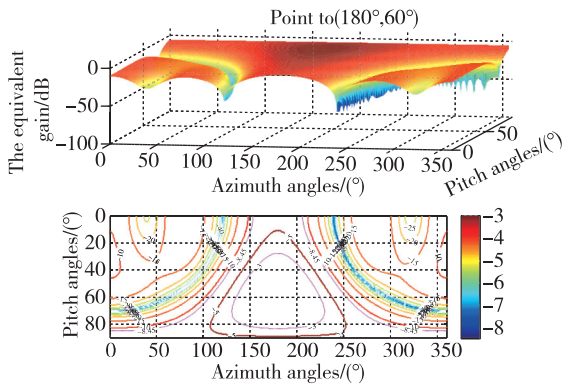


图 5 波束指向 $(180^\circ, 60^\circ)$ 的方向图

Fig. 5 Beam pattern for $(180^\circ, 60^\circ)$

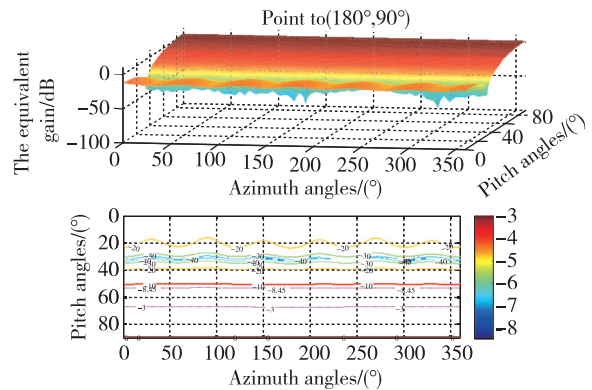


图 6 波束指向 $(180^\circ, 90^\circ)$ 的方向图

Fig. 6 Beam pattern for $(180^\circ, 90^\circ)$

表1 俯仰角方向剖视波束宽度统计结果

Tab. 1 Statistical results of beam width after pitch angle section

俯仰角/(°)	6dB 增益波束宽度/(°)	3dB 增益波束宽度/(°)
20	42	61
30	46	67
40	52	76
50	63	91
60	81	119
70	122	187
80	319	360
90	360	360

表2 方向角方向剖视波束宽度统计结果

Tab. 2 Statistical results of beam width after yaw angle section

俯仰角/(°)	6dB 增益波束宽度/(°)	3dB 增益波束宽度/(°)
20	0~53	0~64
30	0~59	0~68
40	0~69	0~74
50	9~73	0~82
60	32~81	3~90
70	47~90	33~90
80	58~90	48~90
90	69~90	60~90

由表1统计结果可知,沿俯仰角剖视,在不同仰角上设定的固定波束覆盖范围有较大差异,波束仰角越低,波束3dB增益覆盖的方位角范围越小;而波束仰角越高,波束3dB增益覆盖的方位角范围越大。由表2统计结果可知,沿方向角剖视,当波束固定在高仰角时,波束3dB增益覆盖90°以下至某个阈值范围内,且仰角越高,波束3dB增益覆盖范围越小;当波束固定在低仰角时,3dB增益波束覆盖0°以上至某个阈值范围内,且仰角越小,波束3dB增益覆盖范围越小。波束6dB增益的覆盖规律与3dB增益相同。

从卫星分布和抗干扰角度考虑,固定波束指向的仰角不宜过低,从波束增益覆盖范围角度考虑,固定波束指向的仰角不宜过高。因此,在进行固定波束分配时,可以将1个波束指向设定在高仰角90°,剩余波束指向设定在仰角30°~50°范围,以在卫星接收空域内达到较高的波束增益覆盖率。

本文算法设计中,设定6个固定波束,其中1个波束指向仰角90°,另外5个波束仰角均为40°,并在方位角上均匀分布,具体波束指向为(180°, 90°)、(0°, 40°)、(72°, 40°)、(144°, 40°)、(216°, 40°)、(288°, 40°)。由表1和表2可知,6个固定波束的

3dB增益波束覆盖了天线阵列整个上半球空间,6dB增益可以覆盖78.7%的上半球空间。

2.2 优质卫星信号筛选

固定多波束抗干扰将整个空域分为 P 个子空间,并形成 P 个波束,每个波束可能会覆盖多颗卫星信号,即,抗干扰处理后 P 个波束的空域合集中可能含有多个重叠的卫星信号,因此需要对卫星信号进行筛选。

本文提出的方法是在捕获跟踪通道后增加一个卫星信号筛选模块。模块示意图如图7所示。当捕获跟踪到 i 号卫星时,首先计算该卫星的SNR

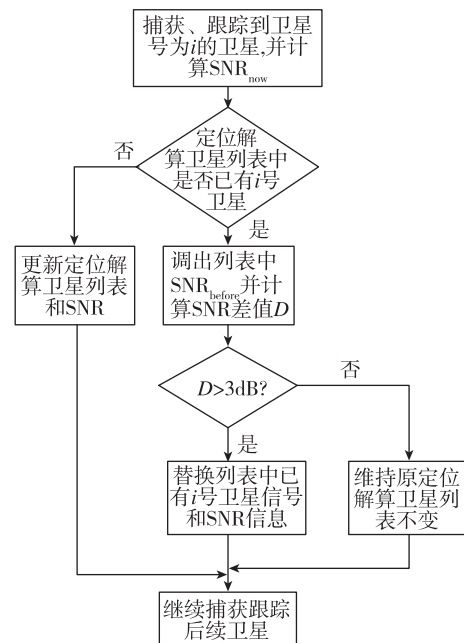


图7 优质卫星筛选流程图

Fig. 7 Flowchart of choosing high quality satellite

$$\text{SNR} = 10 \log \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \quad (7)$$

得到 SNR_{now} ,然后判断当前定位解算卫星列表中是否已含 i 号卫星;如果列表中没有 i 号卫星,则将当前捕获跟踪到的 i 号卫星添加到定位解算卫星列表,并更新SNR;否则,调出列表中 i 号卫星的 $\text{SNR}_{\text{before}}$,计算SNR的差值 D

$$D = \text{SNR}_{\text{now}} - \text{SNR}_{\text{before}} \quad (8)$$

如果 $D > 3\text{dB}$,则当前 i 号卫星取代原定位解算列表中的 i 号卫星加入定位解算卫星列表,并更新 $\text{SNR}_{\text{before}}$;否则,维持原定定位解算卫星列表不变。

以6个波束子空间共收到10颗卫星为例,从6个分集中优选信噪比高的卫星进行定位解算的示

意图如图 8 所示。用圆周代表波束子空间, $S_n (n = 1, 2, 3, \dots, 12)$ 代表收到的卫星序列号。子空间 P_1, P_2, \dots, P_6 共收到 10 颗卫星, 分别为

- $P_1: S_4, S_5, S_6, S_8;$
- $P_2: S_1, S_2, S_4;$
- $P_3: S_2, S_3, S_6;$
- $P_4: S_7, S_8;$
- $P_5: S_9;$
- $P_6: S_8, S_{10}。$

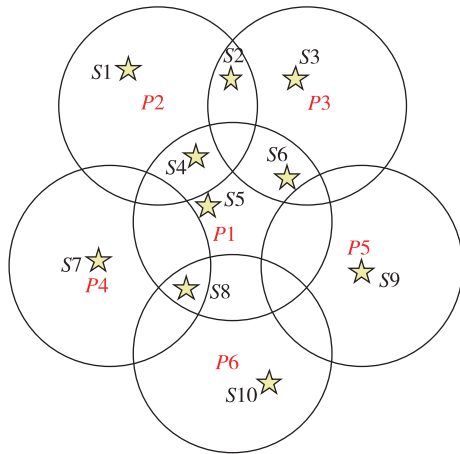


图 8 各分集收星示意图

Fig. 8 Schematic diagram of each diversity receiving stars

依据选星准则, $S_1, S_3, S_5, S_7, S_9, S_{10}$ 直接参与定位解算。而 S_2, S_4, S_6, S_8 均有 2 个以上(含 2 个)的波束收到, 需要根据信噪比筛选卫星进行后续的定位解算。用 $S_n_P_m (n = 1, 2, \dots, 10; m = 1, 2, \dots, 6)$ 表示子空间 P_m 收到的 S_n 号卫星, 则最后用于定位解算的卫星为

- $S_1_P_2, S_3_P_3, S_5_P_1, S_7_P_4, S_9_P_5, S_{10}_P_6;$

- $MAX_SNR_D\{S_2_P_2, S_2_P_3\};$
- $MAX_SNR_D\{S_4_P_1, S_4_P_2\};$
- $MAX_SNR_D\{S_6_P_1, S_6_P_3\};$
- $MAX_SNR_D\{S_8_P_1, S_8_P_4, S_8_P_6\}。$

其中, MAX_SNR_D 表示选取集合中信噪比最高且与其他卫星信噪比差值大于 3dB 的卫星, 如不满足 $D > 3dB$ 条件时, 按捕获跟踪顺序选取卫星。

3 性能仿真验证

3.1 仿真条件

为了验证固定多波束方法的抗干扰性能, 本文

采用基于 MATLAB 数值仿真的形式将固定多波束 (Fixed Multi-Beamforming, FMB) 算法与自适应调零算法 (PI 准则)、典型自适应波束形成算法 (MVDR 准则) 在同一干扰环境进行了性能比较。具体仿真条件如下:

1) 天线阵

天线阵沿用第 2 节图 3 介绍的带有中心参考阵元的七阵元圆阵, 天线阵元间距满足卫星信号半波长要求。

2) 卫星信号和干扰信号

选取本地某一时刻真实的 GPS 可见卫星分布情况作为仿真的卫星星座条件, 如图 9 所示, 并针对 GPS L1 频点设置干扰。干扰信号为宽带高斯噪声干扰, 中心频点为 1575.42MHz, 干扰带宽为 2MHz, 与卫星信号的带宽相同。带内热噪声为 $-140dBW$, 卫星信号信噪比为 $-20dB$, 干扰信号的干噪比为 70dB。详细参数设置如表 3 所示。

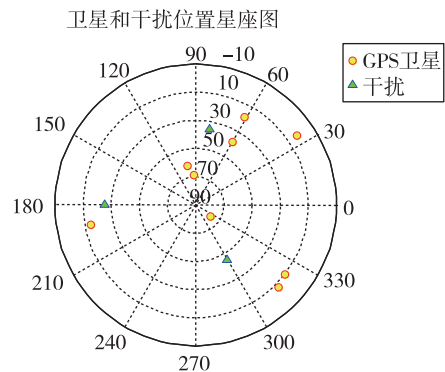


图 9 卫星和干扰位置星座示意图

Fig. 9 Maps of satellite and jamming

表 3 卫星和干扰仿真参数设置

Tab. 3 Settings of satellite and jamming simulation

卫星星号	俯仰角/(°)	方向角/(°)	(SNR/JNRin)/dB
10	76	322	-20
04	69	94	-20
23	62	102	-20
20	38	60	-20
05	18	61	-20
26	14	191	-20
29	10	322	-20
16	7	315	-20
07	2	35	-20
干扰 1	35	80	70
干扰 2	25	180	70
干扰 3	45	300	70

3) 误差项

实际硬件系统中,误差来源主要包括阵元通道幅相误差和 ADC 量化噪声。器件发热和老化、天线阵周围环境的变化、阵元天线安装误差、滤波器群延时差异等,都会引起通道幅相特性的变化。ADC 分辨率、时钟源抖动等误差都将产生 ADC 量化噪声。因此,本文仿真中考虑硬件(阵列天线、射频通道)通道幅相不一致误差、ADC 量化误差和波束形成指向精度误差。

M 自适应天线阵的通道不一致系数矩阵数学模型为^[1]

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \rho_1 e^{j\psi_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \rho_2 e^{j\psi_2} & 0 & 0 & 0 \\ & & \ddots & \ddots & 0 \\ & & & \ddots & 0 \\ & & & & \rho_i e^{j\psi_i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, ρ_i 和 ψ_i 分别为第 i 通道的幅度误差和相位误差, ρ_i 服从高斯分布, ψ_i 服从均匀分布。对于接收天线阵列而言,其阵列流型矩阵为

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{\Gamma} \times \mathbf{A} \quad (10)$$

式中, \mathbf{A} 为阵列方向矢量。

相应地,天线阵的输出则变化为^[8]

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{\Gamma} \mathbf{A} [\mathbf{S}(t) + \mathbf{J}(t)] + \mathbf{N}(t) \quad (11)$$

式中, $\mathbf{N}(t)$ 为通道噪声向量。

ADC 对输入的模拟信号进行采样和量化,定义 ADC 最大量化范围为 $\pm V$, 量化位数为 N_{ADC} , 则 Δ 表示 ADC 的最小量化间隔, Δ 为^[14]

$$\Delta = \frac{2V}{2^{N_{\text{ADC}}} - 1} \quad (12)$$

实际工程中,ADC 的量化噪声可以通过 ADC 的有效位数(ENOB)来表征。

MVDR 波束指向精度误差服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, μ 为波束指向误差的均值, σ^2 为波束指向误差分布的方差。

综上分析,本文仿真中的误差项参数设置为:各通道的幅度误差在 $-3\text{dB} \sim 3\text{dB}$ 内服从高斯分布,相位误差在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 内均匀分布;ADC 量化位数为 16 位,有效位数为 12 位;MVDR 波束指向精度误差均值 μ 分别为 5° 、 10° 、 15° 和 20° , 方差 σ^2 为 1° 。

3.2 仿真结果

分别对无误差理想条件下和有误差非理想条件下不同算法的抗干扰性能进行仿真,统计抗干扰处理后卫星信号的 SINR。

1) 理想条件

理想条件下各算法的抗干扰仿真结果如图 10 所示。

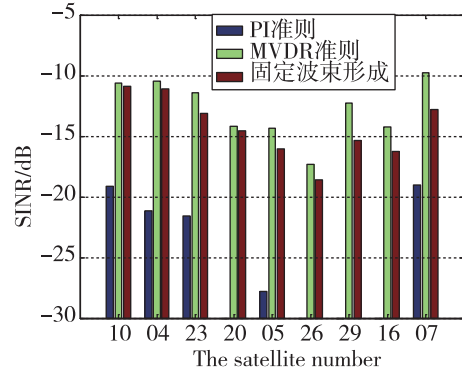


图 10 理想条件下不同算法抗干扰处理后的卫星信号 SINR
Fig. 10 Comparisons of SINR after different processing

当抗干扰输出的卫星信号 $\text{SINR} < -30\text{dB}$ 时,认为接收机不能正常捕获跟踪到该颗卫星,因此,图 10 中未画出 $\text{SINR} < -30\text{dB}$ 的卫星。从图 10 中可以看出,PI 算法的抗干扰性能最差,MVDR 波束形成算法的抗干扰性能最好,本文提出的 FMB 波束形成算法与 MVDR 波束形成算法的性能接近。这是因为 PI 算法在抑制干扰的同时未对卫星信号进行有效保护,当干扰与卫星的空间分布比较接近时,PI 算法对卫星信号的能量造成较大衰减。而理想条件下,MVDR 波束形成算法可以将波束准确地指向各颗卫星,形成最高波束增益,从而获得最优的抗干扰性能。FMB 波束形成算法通过最优波束空间分配使波束增益覆盖到了所有卫星,并筛选信噪比高的优质卫星参与定位解算,从而获得接近 MVDR 波束形成的次优抗干扰性能。

2) 非理想条件

加入硬件通道幅相不一致误差、ADC 量化噪声误差和 MVDR 波束指向精度误差后,各算法的抗干扰仿真结果如图 11 所示。

如图 11 所示,在存在通道幅相误差和波束指向精度误差的情况下,PI 算法的抗干扰性能依然最差,MVDR 波束形成的抗干扰性能随着波束指向精度误差的增加出现下降,特别是 20 号星和 5 号星的 SINR 下降明显,本文提出的 FMB 算法抗干扰性能无明显下降。表 4 统计了 MVDR 波束形成算法与 FMB 波束形成算法抗干扰处理后输出的同一颗卫星的 SINR 差值,其中,当 MVDR 算法处理后的卫星信号信干噪比高时,数值为正,反之为负。

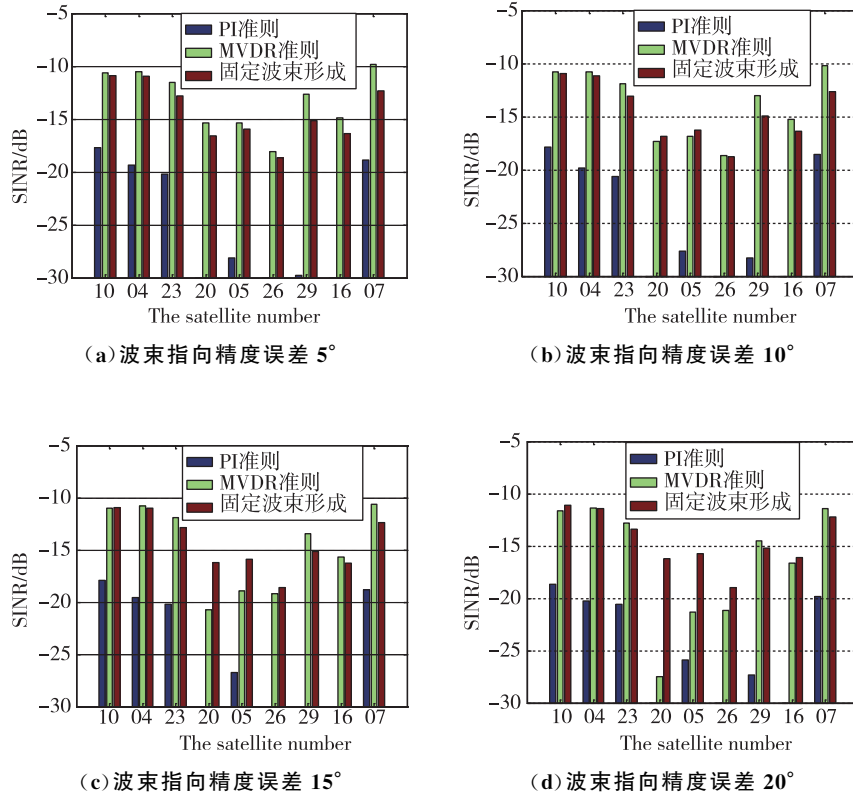


图 11 非理想条件下不同算法抗干扰处理后的卫星信号 SINR

Fig. 11 Comparisons of SINR after different processing

表 4 不同算法处理后信号信干噪比统计表

Tab. 4 SNR statistical results of signal processed by different algorithms

指向误差	卫星信干噪比差值/dB									
	10	04	23	20	05	26	29	16	07	平均值
5°	0.27	0.41	1.24	1.24	0.57	0.58	2.49	1.50	2.53	1.20
10°	0.12	0.36	1.21	-0.50	-0.55	0.12	1.90	1.14	2.45	0.70
15°	-0.07	0.23	0.94	-4.56	-3.07	-0.60	1.74	0.58	1.77	-0.34
20°	-0.49	0.05	0.58	-11.24	-5.57	-2.21	0.71	-0.56	0.81	-1.99

由表 4 可知,在存在硬件通道幅相误差的条件下,当波束指向精度误差为 5°时,FMB 算法抗干扰输出的卫星信号 SINR 与 MVDR 算法非常接近,两种算法 SINR 差值的平均值为 1.20dB;当波束指向精度误差为 10°时,两种算法的 SINR 差值进一步缩小为 0.77dB,且 20 号和 5 号卫星经 FMB 算法处理后的 SINR 已高于 MVDR 算法;当波束指向精度误差为 15°时,经 FMB 算法处理后,有 4 颗卫星的 SINR 高于 MVDR 处理结果;当波束指向精度误差为 20°时,FMB 算法处理后卫星的 SINR 高于 MVDR 算法 1.99dB,5 颗卫星的 SINR 高于 MVDR 算法,特别是 20 号和 5 号卫星的 SINR 差距明显,分别达到 11dB 和 5dB 以上。

从仿真结果可以看出,本文提出的 FMB 波束形成算法在通道幅相不一致误差、ADC 量化噪声误差和波束指向误差存在的条件下,可以达到与典型 MVDR 波束形成算法相当的抗干扰性能。在波束指向精度误差为 20°的恶劣条件下,固定多波束方法的抗干扰性能更优,对 SINR 的性能改善最高达到 11dB,平均改善 1.99dB。相对于 MVDR 算法,FMB 算法具有更好的抗干扰鲁棒性,更易于工程实现。

4 结论

典型的自适应波束形成技术在工程实现中依赖卫星来向、载体姿态等先验信息,受硬件通道幅

相误差和波束指向精度误差的影响较大,且硬件标定复杂度高。针对这一问题,本文提出了一种固定多波束卫星导航接收机抗干扰方法,并给出了最优的波束空间分配方案和卫星筛选定位策略。该方法无需先验信息辅助和复杂的硬件误差标定,鲁棒性强且更易工程实现。性能仿真验证结果表明:在实际工程误差存在的条件下,本文提出的固定多波束抗干扰方法性能与典型的自适应波束抗干扰方法性能相当。在波束指向精度误差为 20° 的恶劣条件下,固定多波束方法的抗干扰性能更优,对 SINR 的性能改善最高达到 11dB,平均改善 1.99dB。

参考文献

- [1] Kaplan E D, Hegarty C J. GPS 原理与应用(第二版) [M]. 寇艳红,译. 北京:电子工业出版社,2007.
Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications (2nd editioned) [M]. Kou Hongyan, Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007(in Chinese).
- [2] O' Brien A J. Adaptive antenna array for precision GNSS receivers[D]. US: The Ohio State University, 2009.
- [3] Arribas J, Fernandez-Prades C, Closas P. Antenna array based GNSS signal acquisition for interference mitigation[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 233-243.
- [4] 王永量,丁前军,李荣峰. 自适应阵列处理[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
Wang Yongliang, Ding Qianjun, Li Rongfeng. Adaptive array processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009(in Chinese).
- [5] Cuntz M, Konovaltsev A, Meurer M. Concepts, development, and validation of multi-antenna GNSS receivers for resilient navigation[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(6): 1288-1301.
- [6] Gupta I J, Weiss I M, Morrison A W. Desired features of adaptive antenna arrays for GNSS receivers [J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(6): 1-12.
- [7] 吕潇君,张兆林,王玲. 幅相误差对数字多波束导航抗干扰影响分析[J]. 导航定位学报,2016,4(3):15-19,39.
Lyu Xiaojun, Zhang Zhaolin, Wang Ling. Influence analysis of amplitude and phase errors on digital multi-beam navigation anti-jamming systems[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(3): 15-19, 39(in Chinese).
- [8] 安毅,李阳. 量化位数对阵列天线 ADC 接收机的影响[J]. 电讯技术,2019,59(6):652-658.
An Yi, Li Yang. Influence of ADC quantization on GNSS receiver with antenna array[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(6): 652-658 (in Chinese).
- [9] 王敏,马晓川,鄢社锋,等. 阵列幅度/相位误差的有源校正新方法[J]. 信号处理,2015,31(11):1389-1395.
Wang Min, Ma Xiaochuan, Yan Shefeng, et al. New calibration method for array gain and phase errors with signal sources[J]. Journal of Signal Processing, 2015, 31(11): 1389-1395(in Chinese).
- [10] Backen S, Akos D M, Nordenvaad M L. Post-processing dynamic GNSS antenna array calibration and deterministic beamforming[C]// Proceedings of 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. ION GNSS, 2008.
- [11] Daneshmand S, Marathe T, Lachapelle G. Millimeter level accuracy GNSS positioning with the blind adaptive beamforming method in interference environments[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1824.
- [12] Gao G. X, Sgammini M, Lu M, et al. Protecting GNSS receivers from jamming and interference[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(6): 1327-1338.
- [13] Joo I, Choi S, chun J, et al. Robust cross-score algorithm against bit transitions for GPS interference suppression[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1325-1328.
- [14] Xu H, Cui X, Shen J, et al. A two-step beamforming method based on carrier phases for GNSS adaptive array anti-jamming[C]// Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, ION ITM. Monterey, California, 2016: 793-804.
- [15] 张星,张坤,毕彦博,等. 卫星导航接收机中多波束抗干扰技术[J]. 全球定位导航,2012,37(5):46-51.
Zhang Xing, Zhang Kun, Bi Yanbo, et al. Multi-beam anti-jamming technique in satellite navigation receiver[J]. GNSS World of China, 2012, 37(5): 46-51(in Chinese).