

## 载波相位辅助的卫星导航天线阵抗干扰算法\*

陈飞强, 聂俊伟, 苏映雪, 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:**针对卫星导航接收机的抗干扰问题,提出一种基于载波相位辅助的卫星导航天线阵抗干扰算法。该算法进行盲零陷形成的同时利用各阵元通道输出信号的载波相位辅助来进行盲波束形成,并通过控制算法实现智能切换。仿真结果表明,提出的算法在干扰环境且接收机冷启动的条件下仍能成功抑制干扰、正常运行,在无干扰或弱干扰条件下能进行波束形成来增强卫星信号,从而提高卫星可见性以及定位精度。提出的算法不需要姿态测量单元辅助且对阵元幅相不一致引起的导向矢量误差不敏感,其实现代价远小于传统的波束形成算法。

**关键词:**卫星导航;波束形成;天线阵;抗干扰;功率倒置;载波相位

**中图分类号:**TN967.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)06-069-05

## Anti-jamming algorithm for GNSS antenna array aided by carrier phase

CHEN Feiqiang, NIE Junwei, SU Yingxue, WANG Feixue

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

**Abstract:** An anti-jamming algorithm for satellite navigation antenna array aided by carrier phase was proposed to mitigate the interference of satellite navigation receiver. The blind null steering was achieved through the algorithm and the blind beam steering was realized simultaneously with the aid of the carrier phase of the output signal from each individual antenna, and two steerings could be switched by a control algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm performs well at “cold” start when the receiver is initiated in strong interference conditions. It can enhance the satellite signals by steering beams to the satellites under noninterference or weak interference conditions, so the visibility and positioning accuracy of satellite are improved. The proposed algorithm can work normally without the aid of inertial measurement unit, and is robust to the steering vector errors caused by amplitude-phase mismatch. It has less cost than traditional beamforming algorithms for implementation.

**Key words:** satellite navigation; beamforming; antenna array; anti-jamming; power inversion; carrier phase

对于全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS),干扰和多径是影响接收机导航定位性能的两个主要因素<sup>[1]</sup>。干扰能引起接收机信噪比恶化,导致接收机无法正确估计信号参数(例如伪码和载波相位),甚至使接收机完全无法捕获到信号。信号的多径传播尤其是短时延多径会导致接收机定位精度下降,且多径与对流层误差、钟差等误差源不同,它难以通过差分处理技术消除<sup>[2]</sup>。

GNSS在军事上的重要性要求不断提高GNSS接收机的精度以及其在干扰环境下的生存能力。自适应天线阵是一种有效的GNSS抗干扰、抗多径措施<sup>[3-5]</sup>,它通过控制阵列中各阵元的增益和相位,使阵列方向图在干扰方向形成零陷

来抑制干扰。若卫星信号的入射方向已知,则GNSS天线阵可进一步在信号方向形成波束来提高信号方向的增益、减小其他方向的增益,达到增强信号、减小多径干扰从而提高定位精度的目的。

对于核心应用领域尤其是军事应用而言,GNSS抗干扰接收机要求具备在干扰环境下冷启动(在没有自身位置以及指向等先验信息的条件下启动)时仍能正常工作的能力<sup>[6]</sup>。尽管接收机可通过存储的历书来获取卫星位置,但在干扰抑制前其无法获取卫星信号的导向矢量。这种情况下,传统的波束形成算法<sup>[7-8]</sup>可能无法正常运行<sup>[6]</sup>。盲抗干扰算法,例如功率倒置(Power Inversion, PI)算法<sup>[9-10]</sup>可以在无先验信息的条件下自适应地在干扰方向形成零陷,具备突出的

\* 收稿日期:2015-04-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371158,61071140)

作者简介:陈飞强(1988—),男,湖南益阳人,博士研究生,E-mail:matlabfly@hotmail.com;

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

抗干扰能力。盲抗干扰算法的缺点是无法在信号方向形成波束,未能利用天线阵来增强信号、减小多径干扰。因此尽管采用了天线阵,但在无干扰下其性能相比普通的单天线接收机没有任何优势,且天线阵实现复杂度和代价更高。文献[11-12]提出了一种利用天线阵各阵元通道接收信号的载波相位来获取卫星信号导向矢量的方法,但在干扰尤其是宽带干扰条件下,单阵元通道接收的信号难以被捕获跟踪,无法得到载波相位,因而该方法只适用于无干扰或弱干扰条件。

## 1 阵列信号模型

考虑一个  $N$  元天线阵,假设远场处有一个期望信号(即 GNSS 信号,设其对应的卫星编号为  $k$ )和  $P$  个互不相干的干扰以平面波入射,则阵列接收信号矢量可表示为 GNSS 信号、干扰和噪声的叠加:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \mathbf{s}(t) + \mathbf{j}(t) + \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{a}_s \mathbf{s}(t) + \sum_{m=1}^P \mathbf{a}_m \mathbf{j}_m(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}(t)$  为  $N$  维阵列数据矢量,  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ ;  $\mathbf{n}(t)$  为  $N$  维阵列噪声矢量,  $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$ , 假设噪声为高斯白噪声;  $\mathbf{a}_s$  为信号导向矢量,  $\mathbf{a}_m$  ( $m = 1, 2, \dots, P$ ) 为第  $m$  个干扰的导向矢量, 导向矢量由信号(或干扰)的入射方向以及阵元相对参考接收点的位置坐标确定;  $\mathbf{s}(t)$  为信号的复包络,  $\mathbf{j}_m(t)$  为第  $m$  个干扰的复包络。

假设信号、干扰以及噪声之间不相关,阵列数据的相关矩阵可表示为:

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{R}_{ss} + \mathbf{R}_{jj} + \mathbf{R}_{nn} \quad (2)$$

各路信号经阵列权矢量  $\mathbf{w}$  加权求和后得到阵列输出信号为:

$$y(t) = \sum_{k=1}^N w_k^* x_k(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) \quad (3)$$

最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)算法是一种传统的波束形成算法,该算法既能在干扰方向形成零陷,又能在信号方向形成波束。其基本原理是约束期望信号方向的阵列响应为 1,使阵列输出信号的功率最小, MVDR 算法的权矢量可表示为<sup>[6]</sup>:

$$\mathbf{w} = \mu \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{a}_s \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为一常数。从式(4)可以看到, MVDR 算法的权矢量表达式中含有期望信号导向矢量,而期望信号导向矢量一般通过卫星位置、接收机位

置以及天线阵姿态计算得到。接收机在干扰条件下冷启动时,干扰抑制前其位置无法获得,因此该算法无法正常运行。另外,天线阵元间的幅相不一致可能引起导向矢量估计误差,从而导致算法的阵列性能下降<sup>[13]</sup>。

PI 算法是一种典型的盲抗干扰算法,其基本原理是以某一个阵元接收信号作为参考,调整其他支路的阵列加权使阵列的输出功率最小。若以第一个阵元做参考, PI 算法的权矢量可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\mathbf{w} = \alpha \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{c} \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为一常数,  $\mathbf{c} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T$  是第一个元素为 1、其余元素为 0 的  $N$  维列矢量。从式(5)可以看到该算法没有利用信号的方向信息,因而无法在信号方向形成波束。

## 2 载波相位辅助的抗干扰算法

算法原理框图如图 1 所示。输入的阵列数据分别经过盲零陷形成算法和盲波束形成算法进行处理,得到两路阵列合成输出,最后输出切换控制算法通过一定的最优准则选择某一路作为最终的输出。

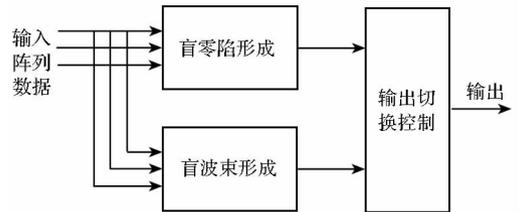


图 1 本文算法原理框图

Fig. 1 Block diagram of the proposed algorithm

### 2.1 盲零陷形成

盲零陷形成算法采用目前较为成熟的 PI 算法。由于盲零陷形成算法只形成指向干扰的零陷,不针对卫星信号方向进行波束形成,因此该算法针对所有的卫星具有相同的阵列权值和加权处理过程。根据式(3)和式(5),盲零陷形成算法的输出可表示为:

$$y_1(t) = \alpha \mathbf{c}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{x}(t) \quad (6)$$

从式(6)可以看到,该算法不需要卫星位置、接收机位置、天线阵姿态等先验信息,即使在干扰环境下冷启动时也可正常运行来抑制干扰,接收信号。

### 2.2 盲波束形成

在无干扰或弱干扰条件下,天线阵接收机可以对每个阵列通道的输出信号分别进行卫星捕获和

跟踪处理,其处理过程跟普通单天线接收机相同。

假设卫星  $k$  可见且可被正常捕获跟踪到,那么每个阵列通道对应的跟踪环均可以得到一个载波相位估计结果  $\varphi_n^k (n = 1, 2, \dots, N)$ 。这些载波相位估计结果可以用来估计卫星  $k$  的导向矢量<sup>[11-12]</sup>:

$$\hat{\mathbf{a}}_s = [1 \quad \exp(-j(\varphi_2^k - \varphi_1^k)) \quad \dots \quad \exp(-j(\varphi_N^k - \varphi_1^k))]^T \quad (7)$$

由于天线阵元间的幅相不一致对接收信号的影响将会体现在载波相位当中,因此即使不对天线阵进行校正,这种方法也能正确估计出信号的导向矢量。

估计得到信号导向矢量后,进一步可以用 MVDR 算法的原理来进行盲波束形成。盲波束形成算法的输出可表示为:

$$y_2(t) = \mu \hat{\mathbf{a}}_s^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{x}(t) \quad (8)$$

从式(8)可以看到,该算法的关键是导向矢量  $\hat{\mathbf{a}}_s$  的获取,一旦环境中存在强干扰,那么单个阵列通道的输出信号将无法被捕获跟踪到,因而也无法得到导向矢量  $\hat{\mathbf{a}}_s$ 。但此时只要接收机的动态较小或者卫星信号的真实导向矢量变化不大,则仍然可以用前一时刻得到的  $\hat{\mathbf{a}}_s$  来进行盲波束形成。

### 2.3 输出切换控制

盲零陷形成算法可以在干扰环境下接收机冷启动时正常运行,而盲波束形成算法能在无干扰或弱干扰条件下形成波束使性能更优。两种算法各有优势,因此需通过输出切换控制算法来选择哪一路作为最终的输出。

切换控制可以通过两种算法来实现。第一种算法是增加一个干扰检测模块,当检测到环境中的干扰功率超过一定门限时则选择盲零陷形成算法的输出作为最终输出,否则选择盲波束形成算法。这种切换控制算法实现简单,但可能不是最优的,因为即使当环境中的干扰功率超过门限、单个阵元通道的输出信号无法被捕获跟踪到时,盲波束形成算法仍然可能通过采用前一时刻估计的导向矢量进行波束形成而获得优于盲零陷形成算法的性能。

考虑到载噪比(carrier-to-noise ratio,  $C/N_0$ )或等效载噪比<sup>[14]</sup>(考虑干扰抑制后存在残余干扰的情况,将残余干扰等效成噪声来处理)将直接决定后端的伪码和载波相位测量精度,因此第二种算法是通过载噪比监测(存在残余干扰时测量

得到的是等效载噪比)来完成输出切换。当盲零陷形成算法输出信号的载噪比大于盲波束形成算法输出信号的载噪比时,选择前者作为最终的输出,否则选择后者。

载噪比可以从跟踪环输出的相干积分结果估计得到,目前导航接收机中广泛采用的载噪比估计方法是宽窄带载噪比估计法<sup>[15]</sup>。假设接收机跟踪环输出的同相和正交相干积分结果分别为  $I_p(n)$  和  $Q_p(n)$ ,相关积分时间为  $T$ ,则在噪声带宽分别为  $1/T$  和  $1/(MT)$  条件下对应的宽带功率和窄带功率可表示为<sup>[15]</sup>:

$$P_{wb}(k) = \sum_{n=kM+1}^{kM+M} [I_p^2(n) + Q_p^2(n)] \quad (9)$$

$$P_{nb}(k) = \left[ \sum_{n=kM+1}^{kM+M} I_p(n) \right]^2 + \left[ \sum_{n=kM+1}^{kM+M} Q_p(n) \right]^2 \quad (10)$$

将窄带功率用宽带功率进行归一化并求平均,其平均值可表示为:

$$\mu_p = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^K \frac{P_{nb}(k)}{P_{wb}(k)} \quad (11)$$

式(9)、式(10)、式(11)中的  $M$  和  $K$  均为正整数,可根据伪码周期和调制数据速率来选取。最终估计的载噪比可用式(12)计算得到:

$$C/N_0 = \frac{1}{T} \cdot \frac{\mu_p - 1}{M - \mu_p} \quad (12)$$

### 2.4 算法实现结构

根据上面的推导过程,本文算法总的实现结构可以描述为图2所示。由图可以看出,算法由于增加了大量的跟踪环,其实现复杂度要高于PI算法。但是,一方面,由于跟踪环是导航接收机中一个非常成熟的模块,目前的数字处理器强大的处理能力完全可以使本文算法得以实时实现。另一方面,相对传统的波束形成算法而言,本文算法不需要姿态测量单元辅助,因而其实现代价远远低于传统波束形成算法。

## 3 性能仿真

为验证本文算法的性能,用软件接收机进行了仿真。首先用MATLAB生成阵列信号,用来模拟产生天线阵接收到的不同入射方向上的GNSS信号、干扰以及噪声。然后用本文算法对生成的阵列信号进行处理,并与PI算法以及MVDR算法的处理结果进行对比。基本的仿真参数设置如表1所示。

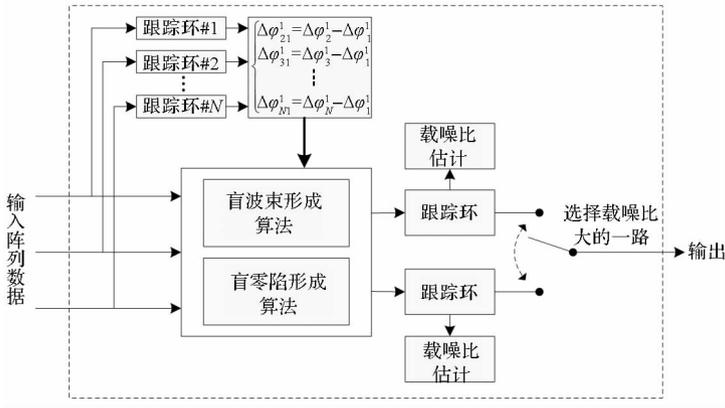


图 2 本文算法实现结构

Fig. 2 Implementation architecture of the proposed algorithm

表 1 仿真中用到的参数

Tab. 1 Parameters used in the simulations

参数类型	参数取值
天线阵型	边长为半波长的 4 元方阵
GNSS 信号类型	北斗 B3 一期民码信号 (PRN 1)
信号入射角	俯仰角 75°, 方位角 45°
干扰 1 类型	20MHz 宽带高斯干扰
干扰 1 干信比	60dB
干扰 1 入射角	俯仰角 5°, 方位角 220°
干扰 2 类型	B3 频点的单频干扰
干扰 2 干信比	60dB
干扰 2 入射角	俯仰角 10°, 方位角 150°

成功捕获跟踪卫星信号。

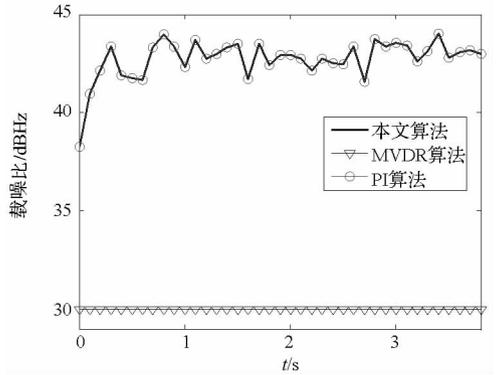


图 3 不同算法对应的信号载噪比

Fig. 3 Output C/N<sub>0</sub> of different algorithms

### 3.1 仿真实验一

仿真实验一用于仿真天线阵接收机在干扰条件下冷启动时,各种算法能否正常运行。仿真中,GNSS 信号的载噪比设定为 42dBHz,干扰 1 和干扰 2 一直处于开启状态,分别用本文算法、PI 算法以及 MVDR 算法进行阵列处理,然后对阵列输出信号进行捕获跟踪,并估计载噪比。

图 3 给出了三种算法处理后得到的信号载噪比。从图中可以看到,在这种条件下,本文算法跟 PI 算法的性能相同,都能正常捕获跟踪到卫星信号,且载噪比几乎没有损失,而 MVDR 算法则无法捕获卫星信号(这时也无法正确估计载噪比,图中为方便对比,以 30dBHz 作为其载噪比结果)。

图 4 给出了本文算法得到的天线阵增益方向图,图中的圆心位置对应俯仰角 90°,圆周边缘对应俯仰角 0°。从图中可以看到,天线阵在两个干扰方向(图中用“o”标示其位置)都形成了很深的零陷。这个仿真实验说明采用本文算法的天线阵接收机在干扰条件下冷启动时,可以正常运行并

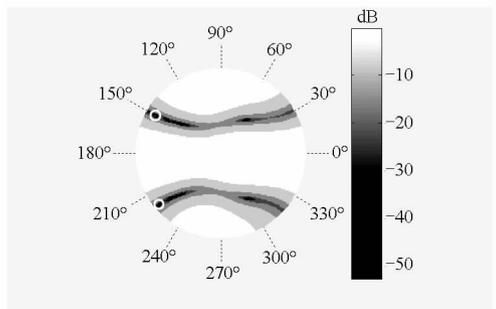


图 4 采用本文算法得到的天线阵增益方向图

Fig. 4 Gain pattern of antenna array obtained by the proposed algorithm

### 3.2 仿真实验二

仿真实验二用于仿真各种算法在无干扰时的性能。仿真条件设置如下:整个实验过程中不开启干扰,GNSS 信号的初始载噪比设定为 42dBHz,且在第 2s 时,GNSS 信号载噪比下降 12dB,用来模拟遮挡或其他原因引起的信号衰减。

图 5 给出了三种算法处理后得到的信号载噪比。从图中可以看到,本文算法与 MVDR 算法的性能相近,在 0 ~ 2s 时,本文算法获得的载噪比比 PI 算法高 6dB 左右,这说明本文算法在

信号方向获得了增益。第 2s 之后,信号衰减了 12dB,此时由于信号载噪比太低,PI 算法无法继续跟踪上信号,跟踪环失锁(图中为方便对比,以 30dBHz 作为其载噪比结果),而本文算法由于利用天线阵将信号增强了 6dB,仍然可以继续跟踪信号。

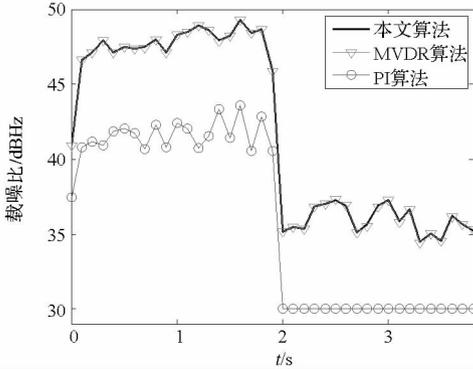


图 5 不同算法对应的信号载噪比

Fig. 5 Output  $C/N_0$  of different algorithms

图 6 给出了本文算法得到的天线阵增益方向图,从图中可以看到,天线阵在信号方向(图中用“x”标示其位置)形成了波束。这个仿真实验说明采用本文算法的天线阵接收机在无干扰条件下可以形成波束来增强卫星信号,从而提高卫星的可见性以及定位精度。

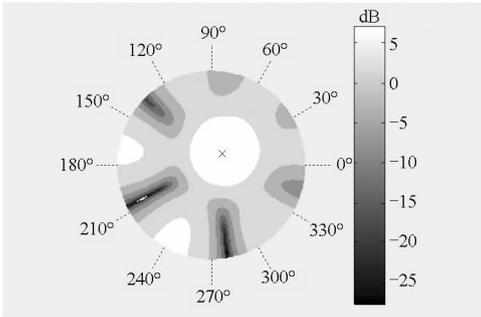


图 6 采用本文算法得到的天线阵增益方向图

Fig. 6 Gain pattern of antenna array obtained by the proposed algorithm

### 3.3 仿真实验三

考虑天线阵元幅相不一致引起的导向矢量误差对算法性能的影响,阵元幅相不一致的模型和参数设置见文献[16]。幅相不一致复系数矩阵  $\Gamma = \text{diag}[r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4]^T$ ,其中  $r_i = A_i e^{j\varphi_i}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ,  $A_i$  和  $\varphi_i$  分别为第  $i$  个通道的幅度和相位误差,且  $A_i \sim N(1, \sigma_A^2)$ ,  $\varphi_i \sim N(0, \sigma_\varphi^2)$ )。仿真中载噪比设定为 42dBHz,不开启干扰(即考虑本文算法切换到波束形成的情况)。表 2 给出了阵元幅相不一致情况下本文算法与 MVDR 算法可获

得的载噪比。

表 2 不同算法得到的载噪比

Tab. 2 Output  $C/N_0$  of different algorithms

	$\sigma_A = 0$ $\sigma_\varphi = 0$	$\sigma_A = 0.3$ $\sigma_\varphi = 3^\circ$	$\sigma_A = 0.5$ $\sigma_\varphi = 5^\circ$
MVDR 算法输出 载噪比/dBHz	48.05	47.63	47.37
本文算法输出 载噪比/dBHz	48.01	47.97	48.02

从表 2 中可以看出随着阵元幅相不一致性增大,MVDR 算法的载噪比损耗越大,而本文算法的载噪比基本不变。这是因为阵元幅相不一致引起了导向矢量误差,导致 MVDR 算法形成的波束指向偏离了真实的卫星方向。而本文算法采用的是载波相位来估计导向矢量,由于阵元幅相不一致对导向矢量的影响将会体现在载波相位当中,因此该算法仍能波束正确指向卫星方向,对幅相不一致引起的导向矢量误差不敏感。

## 4 结论

载波相位辅助的 GNSS 天线阵抗干扰算法集成了盲零陷形成和盲波束形成两者各自的优点,在干扰环境且接收机冷启动的条件下仍能成功抑制干扰、正常运行,且在无干扰或弱干扰条件下能进行波束形成来增强卫星信号,从而提高卫星的可见性以及定位精度。在仿真实验中,采用了与定位性能直接相关的输出信号载噪比来评估算法的性能。仿真结果表明该算法的性能明显优于 PI 算法,且非常接近 MVDR 算法(在干扰环境下冷启动时甚至还要优于 MVDR 算法)。该算法不需要先验信息辅助,其实现代价远小于 MVDR 算法,具有一定的应用价值。需要指出的是,对于提到的根据一定门限来进行输出切换控制,还没有给出最优的门限值,而这是算法工程实现必须解决的问题,有关这方面的问题,将作进一步研究。

## 参考文献 (References)

[1] Daneshmand S, Broumandan A, Lachapelle G. GNSS interference and multipath suppression using array antenna[C]// Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Portland, OR, USA, 2011: 1183 - 1192.

- 差分选方法[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(5): 83 - 89.
- MA Shuang, WU Haibin, LIU Zheng, et al. Method for emitter TDOA sorting based on recursive extended histogram [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(5): 83 - 89. (in Chinese)
- [6] 袁罡,陈鲸. 无源时差定位系统的静止目标聚类检测算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 728 - 731.
- YUAN Gang, CHEN Jing. A clustering detection algorithm of stationary target for passive time difference location system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(3): 728 - 731. (in Chinese)
- [7] 任文娟,胡东辉,丁赤飏,等. 利用测向信息消除高重复频率信号的时差定位模糊[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 3003 - 3007.
- REN Wenjuan, HU Donghui, DING Chibiao, et al. Eliminating TDOA location ambiguity of high PRF signal based on direction information acquired [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 3003 - 3007. (in Chinese)
- [8] 任文娟,胡东辉,丁赤飏. 一种新的利用时差相关性的时差分选配对方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 89 - 96.
- REN Wenjuan, HU Donghui, DING Chibiao. New method for TDOA sorting and pairing using TDOAs' correlation [J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2011, 38(6): 89 - 96. (in Chinese)
- [9] 李英达,肖立志,李吉民,等. 基于网格聚类的复杂雷达信号分选[J]. 现代防御技术, 2013, 41(5): 124 - 128.
- LI Yingda, XIAO Lizhi, LI Jimin, et al. A method of complex radar signal based on grid clustering [J]. Modern Defence Technology, 2013, 41(5): 124 - 128. (in Chinese)
- [10] 李英达,肖立志. 一种脉冲重复间隔复杂调制雷达信号分选方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(10): 2493 - 2497.
- LI Yingda, XIAO Lizhi. A method of signal sorting for radar signal of pulse repetition interval complex modulated [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(10): 2493 - 2497. (in Chinese)
- [2] Seco-Granados G, Fernandez-Rubio J A, Fernandez-Prades C. ML estimator and hybrid beamformer for multipath and interference mitigation in GNSS receivers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(3): 1194 - 1208.
- [3] O'Brien A J. Adaptive antenna arrays for precision GNSS receivers [D]. Columbus, USA: the Ohio State University, 2009.
- [4] Arribas J, Fernandez-Prades C, Closas P. Antenna array based GNSS signal acquisition for interference mitigation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 223 - 243.
- [5] LI M, Dempster A G, Balaei A T, et al. Switchable beam steering/null steering algorithm for CW interference mitigation in GPS C/A code receivers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1564 - 1579.
- [6] Zhang Y D, Amin M G. Anti-jamming GPS receiver with reduced phase distortions [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(10): 635 - 638.
- [7] Frost O L III. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing [J]. Proceeding of IEEE, 1962, 60(8): 926 - 935.
- [8] Applebaum S P. Adaptive arrays [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1976, 24(5): 585 - 598.
- [9] 桑怀胜,李峥嵘,王飞雪,等. 采用RLS算法的功率倒置阵列的性能[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(3): 36 - 40.
- SANG Huai sheng, LI Zhengrong, WANG Feixue, et al. The performance of power inversion array using RLS algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(3): 36 - 40. (in Chinese)
- [10] Compton R T, Jr. The power-inversion adaptive array: concept and performance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, AES - 15(6): 803 - 813.
- [11] Chen Y H, Juang J C, Seo J, et al. Design and implementation of real-time software radio for anti-interference GPS/WAAS sensors [J]. Sensors, 2012, 12(10): 13417 - 13440.
- [12] Chen Y H, Juang J C, De Lorenzo D S, et al. Real-time software receiver for GPS controlled reception pattern antenna array processing [C]// Proceedings of the 23th International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Portland, OR, USA, 2010: 1932 - 1941.
- [13] Daneshmand S, Sokhandan N, Zaeri-Amirani M, et al. Precise calibration of a GNSS antenna array for adaptive beamforming applications [J]. Sensors, 2014, 14(6): 9669 - 9691.
- [14] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2006.
- [15] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- XIE Gang. Principles of GPS and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [16] 王永良,吴仁彪. 通道不一致性、互耦对最优阵列处理器的影响[J]. 系统工程与电子技术, 1993, 15(2): 49 - 55.
- WANG Yongliang, WU Renbiao. Effect of channel-to-channel mismatch and mutual-coupling on the performance of optimum array processors [J]. Systems Engineering and Electronics, 1993, 15(2): 49 - 55. (in Chinese)

(上接第73页)