

文章编号:1001-893X(2008)07-0018-06

## 基于 GPS/INS 与天线阵列的导航系统 抗干扰设计与分析\*

王李军<sup>1,2</sup>, 杨小牛<sup>1</sup>, 赵惠昌<sup>2</sup>

(1. 通信系统信息控制技术国家重点实验室, 浙江 嘉兴 314001; 2. 南京理工大学 电子工程系, 南京 210094)

**摘要:**详细分析了 GPS/INS 紧耦合模型的结构和数学模型, 给出了相应的 EKF 算法。分析了单级 MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) 波束形成技术的缺陷, 建立了多级 MVDR 波束形成技术的设计模型。在此基础上, 给出了基于 GPS/INS 与天线阵列相结合的导航系统抗干扰设计模型。最后对该系统的输出载波噪声比和位置误差进行了仿真分析, 结果表明, 单级波束形成技术由于受到自由度的限制, 在多干扰存在情况下产生较大的距离误差, 而多级波束形成技术可以有效抑制多干扰信号存在的影响, 保证导航系统的可靠工作。

**关键词:**导航系统; 天线阵列; GPS; INS; 抗干扰; MVDR; 自适应波束形成

**中图分类号:**P228.4; TN973.3 **文献标识码:**A

## Anti-jamming Design and Analysis of Navigation System Based on GPS/INS and Antenna Array

WANG Li-jun<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-niu<sup>1</sup>, ZHAO Hui-chang<sup>2</sup>

(1. National Laboratory of Information Control Technology for Communication System,  
Jiaxing 314001, China; 2. Electronic Engineering Department, Nanjing  
University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The structure and mathematical model of tightly coupled GPS/INS integration is detailedly analyzed, whose Extended Kalman Filter (EKF) algorithm is given. And then, the shortcoming of single Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) beamforming is analyzed and the design model of multiple MVDR beamforming is set up. On this base, the anti-jamming model of navigation system combining GPS/INS and antenna array is proposed. Finally, the output Carrier to Noise Ratio and position error is simulated and analyzed. The results demonstrate that the position error of single beamforming technique due to the limited degree of freedom with the large of interference signals is greater than that of multiple beamforming technique, and that multiple MVDR beamforming can effectively mitigate a number of interference signals and ensure the reliability of navigation system.

**Key words:** navigation system; antenna array; global positioning system (GPS); inertial navigation system (INS); anti-jamming; minimum variance distortionless response (MVDR); adaptive beamforming

### 1 引言

纵观近年来的几次局部战争, GPS 制导技术的

应用为目标的精确打击带来了前所未有的效果; 在民用领域对 GPS 导航技术的研究也如火如荼。随着俄罗斯 GLONASS 系统的逐步完善, 欧洲 Galileo

\* 收稿日期: 2008-02-22; 修回日期: 2008-04-29

系统的付诸实施,我国也在组建自己的卫星定位系统。未来战争中,精确制导武器的使用将更为普遍,各种武器系统必将面临更加复杂的对抗环境,因此如何有效提高武器系统的打击精确度和系统工作的可靠性或抗干扰能力将是非常值得研究的问题,这也是当前许多国家普遍关注的问题。

GPS 的抗干扰问题,已有许多相关文献对其进行了阐述<sup>[1,2]</sup>。美国提出了许多军用 GPS 的抗干扰技术<sup>[3]</sup>,典型的方法有时域、频域以及时频域信号处理技术、空域自适应调零天线技术、组合抗干扰技术、各种辅助技术等。由于军用保密的原因,其中一些方法很难找到深入的理论分析和详细的系统设计方法。

本文将 GPS 为例,借助于 INS 和阵列信号处理技术研究导航系统的抗干扰设计问题,对该系统进行详细的建模和分析。

## 2 GPS/INS 组合导航建模

惯性导航系统具有很高测量精度,但是它的误差随时间累积,不能在动态环境中进行长时间的高精度连续导航<sup>[3]</sup>。GPS 也具有高的测量精度,但是其输出数据率比较低(典型值为 1 Hz),不能满足高动态系统工作的要求。将两者的信息进行融合,利用 GPS 的高精度数据间断性对 INS 的数据进行校正,反过来用 INS 的数据辅助 GPS 的捕获跟踪,可以起到优势互补的作用。

图 1 给出了 GPS/INS 的紧耦合模型,这是一种闭环的耦合模型。卡尔曼滤波器利用 GPS 伪距和伪距率的测量值与预测值之差作为滤波状态,输出的误差值用来校正惯性导航方程的相应参数,同时还可以对 GPS 的环路提供辅助,以实现 GPS 信号快速捕获和跟踪。

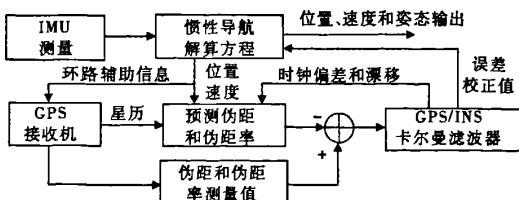


图 1 GPS/INS 紧耦合模型

### 2.1 INS 导航方程

地固坐标系( $e$ 系)下 INS 的导航方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}C_b^e = C_b^e \Omega_{eb}^b \\ \frac{d}{dt}\dot{x}^e = -2\Omega_{eb}^e \dot{x}^e - \Omega_{ie}^e \Omega_{ie}^e x^e + C_b^e a^b + g^e \\ \frac{d}{dt}x^e = \dot{x}^e \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x^e$ 、 $\dot{x}^e$ 分别表示载体的位置和速度, $a^b$ 为载体的加速度测量值, $g^e$ 为 $e$ 系的重力加速度, $C_b^e$ 为载体系( $b$ 系)到 $e$ 系的转换矩阵。反对称矩阵 $\Omega_{eb}^e$ 可以表示为

$$\Omega_{eb}^e = [\omega_{eb}^e \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\omega_{eb}^e = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$ 为 $e$ 系相对于 $b$ 系的角速度,且 $\omega_{eb}^e = \omega_{ib}^e - C_b^e \omega_{ie}^e$ , $\omega_{ib}^e$ 为陀螺仪的测量值, $\omega_{ie}^e$ 为 $e$ 系相对于惯性系( $i$ 系)的地球自转角速度。用 $x$ 表示所有的状态量,则等式(1)可以简写为

$$\dot{x}(t) = f(x(t), a(t)) \quad (3)$$

相应于等式(1)的惯性导航系统的误差状态方程可以表示为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\delta C_b^e = \delta C_b^e \Omega_{eb}^e + C_b^e \delta \Omega_{eb}^e \\ \frac{d}{dt}\delta \dot{x}^e = -2\Omega_{eb}^e \delta \dot{x}^e - (\Omega_{ie}^e \Omega_{ie}^e - \Gamma^e) \delta x^e \\ \quad + \delta C_b^e a^b + C_b^e \delta a^b \\ \frac{d}{dt}\delta x^e = \delta \dot{x}^e \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\delta C_b^e$ 表示转换矩阵 $C_b^e$ 的误差, $\delta x$ 和 $\delta \dot{x}$ 分别表示位置和速度偏差, $\Gamma^e$ 是重力的倒数<sup>[4]</sup>。

### 2.2 GPS 的观测模型

本文采用图 1 所示的伪距和伪距率的组合模型,由此可得 GPS 的观测模型为

$$y = h(x, \dot{x}, c\delta t, c\delta i) + v \quad (5)$$

式中, $c\delta t$ 和 $c\delta i$ 分别表示时钟偏差和时钟漂移, $v$ 为测量噪声。且有式(6):

$$h(\hat{x}, \hat{\dot{x}}, \hat{c\delta t}, \hat{c\delta i}) = \begin{bmatrix} \sqrt{(\hat{x}_u - x_u^1)^2 + (\hat{y}_u - y_u^1)^2 + (\hat{z}_u - z_u^1)^2} + \hat{c\delta t} \\ \sqrt{(\hat{x}_u - x_u^2)^2 + (\hat{y}_u - y_u^2)^2 + (\hat{z}_u - z_u^2)^2} + \hat{c\delta t} \\ \vdots \\ \sqrt{(\hat{x}_u - x_u^p)^2 + (\hat{y}_u - y_u^p)^2 + (\hat{z}_u - z_u^p)^2} + \hat{c\delta t} \\ [(\hat{x}_u - x_u^1)(\hat{x}_u - x_u^1) + (\hat{y}_u - y_u^1)(\hat{y}_u - y_u^1) + (\hat{z}_u - z_u^1)(\hat{z}_u - z_u^1)]/\hat{\rho}^1 + \hat{c\delta i} \\ [(\hat{x}_u - x_u^2)(\hat{x}_u - x_u^2) + (\hat{y}_u - y_u^2)(\hat{y}_u - y_u^2) + (\hat{z}_u - z_u^2)(\hat{z}_u - z_u^2)]/\hat{\rho}^2 + \hat{c\delta i} \\ \vdots \\ [(\hat{x}_u - x_u^p)(\hat{x}_u - x_u^p) + (\hat{y}_u - y_u^p)(\hat{y}_u - y_u^p) + (\hat{z}_u - z_u^p)(\hat{z}_u - z_u^p)]/\hat{\rho}^p + \hat{c\delta i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $\hat{x} = (\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u)$  和  $\hat{\dot{x}} = (\hat{\dot{x}}_u, \hat{\dot{y}}_u, \hat{\dot{z}}_u)$  分别表示接收机的位置和速度估计值,  $(x_u^1, y_u^1, z_u^1)$  和  $(x_u^2, y_u^2, z_u^2)$  分别表示对应时刻卫星的位置和速度,  $\hat{c\delta t}$  和  $\hat{c\delta i}$  分别表示时钟偏差和时钟漂移的估计值。相应的观测矩阵可以表示为

$$H = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & e_{1 \times 3}^1 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 1 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & e_{1 \times 3}^2 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & e_{1 \times 3}^p & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 1 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & e_{1 \times 3}^1 & h_{1 \times 3}^1 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0 & 1 \\ 0_{1 \times 3} & e_{1 \times 3}^2 & h_{1 \times 3}^2 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0_{1 \times 3} & e_{1 \times 3}^p & h_{1 \times 3}^p & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} e_{1 \times 3}^i &= [(\hat{x} - x^i) \quad (\hat{y} - y^i) \quad (\hat{z} - z^i)] / PR_i \\ PR_i &= \sqrt{(\hat{x} - x^i)^2 + (\hat{y} - y^i)^2 + (\hat{z} - z^i)^2} \\ h_{1 \times 3}^i &= \begin{bmatrix} (\hat{\dot{x}} - \dot{x}^i) / PR_i - (\hat{x} - x^i) J_i / PR_i^3 \\ (\hat{\dot{y}} - \dot{y}^i) / PR_i - (\hat{y} - y^i) J_i / PR_i^3 \\ (\hat{\dot{z}} - \dot{z}^i) / PR_i - (\hat{z} - z^i) J_i / PR_i^3 \end{bmatrix}^T \\ J_i &= (\hat{x} - x^i)(\hat{x} - x^i) + (\hat{y} - y^i)(\hat{y} - y^i) \\ &\quad + (\hat{z} - z^i)(\hat{z} - z^i) \end{aligned}$$

### 2.3 组合系统的 EKF 状态模型和算法

组合导航系统的 EKF 状态模型为

$$\varepsilon = [\Psi^T \delta v^T \delta x^T \mid d^T \ b^T \mid \delta(c\delta t) \ \delta(c\delta i)]^T \quad (8)$$

式中,  $\Psi, \delta v, \delta x$  分别表示三维的姿态、速度和位置误差,  $d$  和  $b$  分别表示加速度和陀螺仪的测量偏差,  $\delta(c\delta t)$  和  $\delta(c\delta i)$  分别表示接收机的时钟偏差和时钟漂移。相应的线性系统模型可以表示为

$$\frac{d}{dt} \varepsilon(t) = F(t) \varepsilon(t) + G(t) w(t) \quad (9)$$

其中:

$$F = \begin{bmatrix} F_{INS} & F_{12} & 0_{9 \times 2} \\ 0_{6 \times 9} & 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 2} \\ 0_{2 \times 9} & 0_{2 \times 6} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,  $F_{INS}$  和  $F_{12}$  由方程(4)确定, 即:

$$\begin{aligned} F_{INS} &= \begin{bmatrix} -\Omega_{ie} & 0_3 & 0_3 \\ [a' \times] & -2\Omega_{ie} & \gamma \\ 0_3 & I_3 & 0_3 \end{bmatrix} \\ F_{12} &= \begin{bmatrix} -C_b^e(t) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & C_b^e(t) \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

且

$$\gamma = -(\Omega_{ie} \Omega_{ie} - I^*)$$

GPS/INS 组合导航系统的 EKF 算法描述如下:

(1) 无 GPS 数据

$$\hat{a}_k^- = a_k + \delta \hat{a}_k^-, \hat{x}_{k+1}^- = f(\hat{x}_k^-, \hat{a}_k^-)$$

$$\delta \hat{a}_{k+1}^- = [\Phi_k]_{10:17, 10:17} \delta \hat{a}_k^-$$

$$P_{k+1}^- = \Phi_k P_k^- \Phi_k^* + Q_k$$

(2) 有 GPS 数据

$$K = P_k^- P_k^- H_k^* (H_k P_k^- H_k^* + R_k)^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} \delta \hat{x}_k \\ \delta \hat{a}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{9 \times 1} \\ \delta \hat{a}_k^- \end{bmatrix} + K(y_k - H_k \begin{bmatrix} \hat{a}_k^- \\ 0_{8 \times 1} \end{bmatrix})$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + \delta \hat{x}_k, \hat{a}_k = a_k + \delta \hat{a}_k$$

$$\begin{aligned} P_k &= (I - KH_k)P_k^-(I - KH_k)^T + KR_kK^T \\ \hat{x}_{k+1}^- &= f(\hat{x}_k, \hat{a}_k), \delta\hat{a}_{k+1}^- = [\Phi_k]_{10:17, 10:17} \delta\hat{a}_k \\ P_{k+1}^- &= \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \end{aligned}$$

由以上算法可知,当无 GPS 可用数据时,只进行状态预测,不进行测量更新和误差校正,当 GPS 数据可用时,进行状态预测、测量更新和误差校正。由于 GPS 数据可用时,对 INS 的误差进行校正,故校正完成后需对其相应状态进行复位<sup>[5]</sup>。

3 自适应波束形成技术

自适应波束形成技术是一种有效的干扰抑制技术,它克服了时域频域信号处理的局限性,在空域对干扰进行处理。波束技术抑制干扰数量取决于天线的阵元数,如果天线的阵元数为  $N$ ,则可抑制的干扰的数目等于它的自由度  $N-1$ 。假定卫星信号的方向是已知的,可以通过用户的位置和卫星位置进行推算得出。这样就可以采用 MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) 波束形成技术计算输入信号的加权,使输出信号的 SNR 最大。MVDR 波束形成技术的模型可以表示为<sup>[7]</sup>

$$\begin{cases} \min w^H R_{uu} w \\ A(\theta, \phi) w = 1_{L \times 1} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $R_{uu} = E\{u(k)u^H(k)\}$  为阵列的协方差矩阵,且  $u(k)$  为  $k$  时刻的一组接收信号;  $w$  为波束形成器输出的加权矢量;  $A(\theta, \phi) = [a(\theta_1, \phi_1) \ a(\theta_2, \phi_2) \ \dots \ a(\theta_L, \phi_L)]$ ,  $L$  为接收卫星的数目。由拉格朗日方法,可得最佳权矢量为

$$\hat{w} = \frac{R_{uu}^{-1} A(\theta, \phi)}{A^H(\theta, \phi) R_{uu}^{-1} A(\theta, \phi)} \quad (12)$$

一般来说, GPS 要进行可靠的导航,至少需要接收 4 颗卫星信号,上述的 MVDR 波束方案显然是有局限性的,因为要接收 4 颗卫星信号,需要用天线阵列的 4 个自由度,如果存在大量的干扰信号,且大于天线阵列的剩余自由度,则波束形成技术不足以产生有效的加权矢量。为此,下面给出一种多级波束形成的设计方案,它能同时接收多颗卫星信号,不限于 4 颗,且可以保证不降低系统的整体性能。图 2 给出了多级波束形成技术的原理框图。多级波束形成技术可以针对每颗可见卫星分别进行波束形成和加权处理,它保证所接收卫星的输出 SNR 最大,同时把其它卫星信号作为噪声处理。多级波束形成技

术的数学模型可以表示为

$$\begin{cases} \min w^H R_{xx} w \\ a(\theta_1, \phi_1) w = 1 \\ \text{or}, a(\theta_2, \phi_2) w = 1 \\ \vdots \\ \text{or}, a(\theta_L, \phi_L) w = 1 \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $L$  为可见卫星的数目。

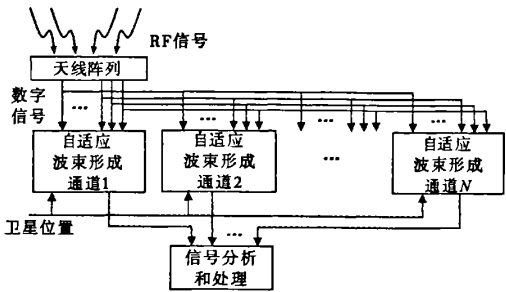


图 2 多级波束形成技术原理图

4 基于 GPS/INS 与天线阵列的导航系统模型

从上面的分析可知, GPS/INS 组合可以提高导航系统的精度,天线阵列可以有效抑制干扰信号。组合导航系统要进行高精度导航,需要 GPS 高精度可靠工作,而天线阵列要得到有效抑制干扰的目的,需要必要的先验信息作为前提条件。卫星的位置可以通过 GPS 的星历数据解算得出,而载体的当前位置需要由 INS 提供,可见三者的关系是彼此依赖的,且互相补充各自的不足之处。图 3 给出了基于 GPS/INS 与自适应波束形成技术的导航系统模型,该模型形象地描述了三者的关系。在该模型中,预测伪距和伪距率直接由 EKF 滤波器模块完成,为了对付多干扰存在的情况,其中的自适应波束形成模块如图 2 所示。

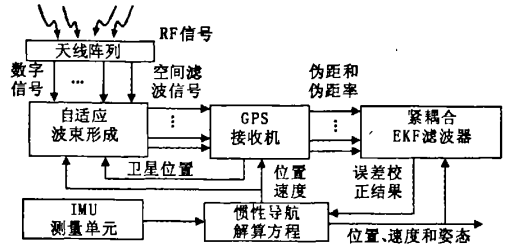


图 3 基于 GPS/INS 与波束形成技术的导航系统模型

图 3 所示模型带来的另外一个好处是可以增加 GPS 信号的信噪比,因而可以提高 GPS 信号的检测概率和环路的跟踪精度,也即可以提高测量精度。具体分析这里不再展开,可以参考相关文献对 GPS 测量与信噪比关系的描述。

## 5 仿真和性能分析

仿真中,采用  $3 \times 3$  的 URA 阵列,相邻阵元的间距为  $d = \lambda/2$ ,  $\lambda$  为 GPS 载波频率的波长,这里主要考虑 L1 信息,故取为 0.19 m。仿真的起始位置为东经  $118^\circ$ ,北纬  $32^\circ$ 。GPS 卫星的历书数据可以从网络上下载,这里采用 GPS 卫星星期数为 373,开始时间为 503 808 s 的数据,对应的 UTC 时间为 2006 年 10 月 20 日,星期五 19:56:48。根据历书数据得出可见卫星的数目为 8 颗(可见卫星高度角取  $15^\circ$ )。

取 GPS 有用信号功率为  $-160$  dBW, GPS 接收机的捕获门限为  $33$  dB-Hz,跟踪门限为  $28$  dB-Hz<sup>[8]</sup>,仿真中暂时不考虑 INS 对 GPS 跟踪环的辅助,这不影响系统工作的可靠性。干扰信号采用宽带噪声干扰,干扰信号数量为 6,功率为  $-110$  dBW。干扰中心处与可见卫星的方位关系如图 4 所示。假设载体以  $270$  m/s 的速度按照图 5 所示的路径飞行,在某个特定区域受到了大量数量的强干扰源干扰。

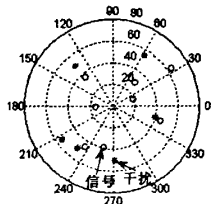


图 4 干扰中心与接收机的方位图

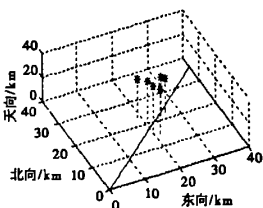


图 5 载体飞行路径

假设陀螺的常值漂移为  $0.1^\circ/\text{h}$ ,随机漂移为  $0.1^\circ/\text{h}^{1/2}$ ,一阶马尔可夫过程漂移为  $0.1^\circ/\text{h}^{1/2}$ ,一阶

马尔可夫过程的相关时间为  $5\,400$  s;加速度的常值偏差为  $500\ \mu\text{g}$ ,随机偏差为  $200\ \mu\text{g}$ ,一阶马尔可夫过程的相关时间为  $2\,700$  s。GPS 的伪距测量误差为  $10$  m,伪距率误差  $0.2$  m/s。

图 6 和图 7 分别给出了单级 MVDR 波束形成技术和多级波束形成技术对干扰的抑制效果。从图中可以看出,当载体在干扰区域之外时,已有部分卫星无法完成信号的捕获和跟踪,当载体进入干扰区域后,所有卫星的载波噪声比 ( $C/N_0$ ) 低于捕获门限,大部分卫星信号的  $C/N_0$  低于跟踪门限,从而导致接收机无法可靠接收信号。而多级波束形成技术尽管在载体进入干扰区域后其  $C/N_0$  有所降低,但是仍大于信号的跟踪和捕获门限,因此可以保证在整个飞行过程中接收机始终可靠跟踪卫星信号。从图 6 也可以看出,在开始时刻仅有 4 颗卫星可以完成捕获和跟踪,在干扰区域仅有 2 颗卫星可以正常跟踪。

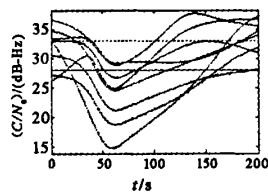


图 6 单级 MVDR 波束形成结果

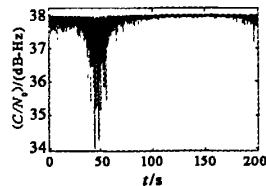


图 7 多级 MVDR 波束形成结果

图 8 给出了导航定位误差的仿真结果,其中虚线为多波形形成技术的位置误差,实线为单级波束形成技术的位置误差。从图中可以看出,单级波束形成技术的定位误差明显大于多级波束形成技术的定位误差。特别是在受干扰区域,由于可以正常跟踪的卫星数目减少,使得 GPS 定位的 GDOP 值下降,定位误差迅速增大。另外,也说明一个问题,即紧耦合 GPS/INS 模型可以工作在少于 4 颗可用卫星的情况下,只是定位误差相对大一些。统计结果表明,单级波束的均方根(RMS)误差为  $13.08$  m,多

级波束形成技术的 RMS 误差为 2.52 m。

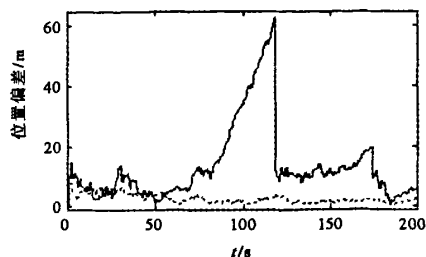


图8 导航定位误差的仿真结果

## 6 结论

本文详细分析了 GPS/INS 紧耦合模型的结构和数学模型,给出了相应的 EKF 算法,分析了单级波束形成技术的缺点,建立了多级波束形成技术的设计模型。考虑 GPS、INS 和波束形成的优势互补性,建立了基于 GPS/INS 与天线阵列的导航系统模型。最后对该系统进行详细的仿真和分析,结果表明,多级波束形成技术可以有效抑制多干扰信号的影响,保证导航系统的可靠工作,单级波束由于受到自由度的限制,性能有所降低。该方案可以非常方便地应用到类似的系统中,为导航系统抗干扰问题的研究和系统设计提供必要的理论基础。

## 参考文献:

- [1] Bradley P Badke. Global positioning system anti-jamming techniques[D]. Arizona State University, 2002.
- [2] Carles Fern'andez Prades. Advanced signal processing techniques for global navigation satellite systems receivers [D]. Department of Signal Theory and Communications, Universitat Polit'cnica de Catalunya, 2005.
- [3] 熊志昂,等. GPS 技术的工程应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [4] Johan Malmström. Robust navigation with GPS/INS and adaptive beamforming[R]. Scientific report of Swedish Defence Research Agency, 2003.
- [5] Shin Eun - Hwan. Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications[D]. Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, 2001.
- [6] Chen Yih - Min. On spatial smoothing for two - dimensional direction of arrival estimation of coherent signals [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45 (7): 1689 - 1696.
- [7] Anthonia Angelova, Christo Kabakchiev. Efficiency of MVDR Sidelobe Canceller in the Presence of Electronic Counter Measurement. Proc. of the International Symposium[C] // IRS 2003. Dresden, Germany, 2003: 615 - 620.
- [8] Kaplan E D. Understanding GPS, Principles and Applications[M]. Artech House Publishers, 1996.

## 作者简介:



王李军(1978 - ),男,博士后,已在国内外核心期刊和国际会议上发表学术论文 30 余篇,主要研究方向:电子对抗、信号处理、智能天线,(电子信箱)wlj7802@yahoo.com.cn;

杨小牛(1961 - ),男,研究员、博士生导师,研究方向为通信对抗及软件无线电技术,已发表学术论文 30 余篇,出版专(译)著 6 部,曾主持并参加国家级大中型科研项目十余项,获国家科技进步一等奖 1 项、国防工业科技进步一等奖 2 项、部级科技进步一等奖 1 项;

赵惠昌(1958 - ),男,教授、博士生导师,研究方向为引信对抗及信号处理技术,曾作为课题负责人主持完成“八五”、“九五”、“十五”国防重点预研课题,完成各层次研究课题十余项,获省部级科技进步奖 3 项、国家发明专利 2 项,出版教材 2 部,在各类刊物上发表学术论文 60 余篇。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训：

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>