

四面体磁梯度张量系统的载体磁干扰补偿方法*

于振涛^{1)†} 吕俊伟¹⁾ 毕波¹⁾ 周静²⁾

1)(海军航空工程学院控制工程系, 烟台 264001)

2)(海军 92474 部队, 三亚 572018)

(2014年1月7日收到; 2014年2月15日收到修改稿)

针对搭载于水下无人航行器(UUV)的四面体磁梯度张量系统易受载体磁场干扰的问题, 提出了一种载体磁干扰补偿方法. 该方法在载体磁干扰产生机理的基础上, 利用磁梯度张量差分测量算法融合四面体磁梯度张量系统中四个矢量磁力仪的载体磁干扰, 建立了磁梯度张量系统载体磁干扰数学模型; 然后在此数学模型的基础上提出了磁干扰补偿方法, 并根据磁梯度张量9分量的数学关系提出了补偿参数辨识方法; 最后通过仿真实验对方法进行了验证, 结果表明该补偿方法可以有效补偿磁梯度张量系统95.9%的载体磁干扰. 该方法利用补偿参数对磁梯度张量系统的输出值直接进行磁干扰补偿, 从理论上解决了磁梯度张量系统中各个矢量磁力仪载体磁干扰的统一补偿问题.

关键词: 磁场, 磁梯度张量, 磁传感器, 误差补偿

PACS: 07.55.Ge, 52.70.Ds

DOI: 10.7498/aps.63.110702

1 引言

近几年, 磁梯度张量测量逐渐成为磁探技术的研究热点. 美国、德国、澳大利亚等国家相继研制出一系列磁梯度张量探测仪器系统, 并开展了大量野外试验. 与其他传统磁测方法相比, 磁梯度张量测量有比较突出的优势, 被认为是磁法勘探的下一代突破^[1,2].

磁传感器测量的磁场信息不可避免的包含载体自身的干扰磁场^[3-6], 这些干扰磁场主要包括载体上硬磁材料产生的固有磁场和软磁材料产生的感应磁场. 载体的固有磁场和感应磁场会严重影响磁梯度张量系统的测量, 需要对其进行磁干扰补偿. Wynn, Allen 和 Pei 等分别对水下无人航行器(UUV)搭载的磁梯度张量系统的各磁噪声进行了研究, 提出了载体磁干扰补偿的研究思路^[7-10]; Pei 等将四面体磁梯度张量系统中受载体磁干扰最小的一个矢量磁力仪作为参考磁力仪, 补偿其他三

个矢量磁力仪, 然后用补偿后的三个矢量磁力仪计算磁梯度张量, 从而实现磁干扰的补偿^[8]. 该方法的优点在于单个矢量磁力仪磁干扰补偿方法较为成熟, 主要有基于 Tolles-Lawson 方程的磁补偿方法^[4]和基于椭圆假设的磁补偿方法^[11-14]; 缺点在于磁干扰补偿忽略了参考磁力仪本身的载体磁干扰, 且没有加入磁梯度张量本身的特征约束, 从而限制了载体磁干扰的补偿效果.

本文针对搭载于 UUV 的四面体磁梯度张量系统的载体磁干扰提出了一种干扰补偿方法, 该方法可以统一补偿系统中每个矢量磁力仪的载体磁干扰. 该方法利用四面体磁梯度张量系统的差分测量算法, 融合系统中单个矢量磁力仪的载体磁干扰, 建立了四面体磁梯度张量系统载体磁干扰数学模型; 然后在此数学模型的基础上提出了载体干扰补偿算法, 并根据磁梯度张量9分量之间的数学关系提出了补偿参数辨识方法. 通过仿真实验对该方法进行了验证, 实验结果表明该补偿方法可以有效补偿磁梯度张量系统的载体磁干扰.

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2010AAJ211)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hjhyzt@163.com

2 磁梯度张量系统

2.1 磁梯度张量

磁场是一个矢量场, 其三分量 B_x, B_y, B_z 在空间三个方向的变化率即为磁梯度张量, 包括 9 个要素, 表达式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= \nabla \mathbf{B} \\ &= \begin{bmatrix} \partial B_x / \partial x & \partial B_x / \partial y & \partial B_x / \partial z \\ \partial B_y / \partial x & \partial B_y / \partial y & \partial B_y / \partial z \\ \partial B_z / \partial x & \partial B_z / \partial y & \partial B_z / \partial z \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

在没有空间电流密度的测量区域, 磁场的散度和旋度都为 0, 即

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \partial B_x / \partial x + \partial B_y / \partial y + \partial B_z / \partial z = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \partial / \partial x & \partial / \partial y & \partial / \partial z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = 0. \quad (3)$$

2.2 四面体磁梯度张量系统

搭载于 UUV 的磁梯度张量系统包含四个矢量磁力仪, 四个矢量磁力仪位于四面体的四个顶点^[8,9], 如图 1 所示.

对系统中四个矢量磁力仪进行 1, 2, 3, 4 编号, 第 i 个矢量磁力仪的磁场为 $\mathbf{B}_i = (B_{xi}, B_{yi}, B_{zi})^T$, 根据差分方程磁梯度张量 9 分量满足以下关系式^[15]:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} B_{x21} & B_{x31} & B_{x41} \\ B_{y21} & B_{y31} & B_{y41} \\ B_{z21} & B_{z31} & B_{z41} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \partial B_x / \partial x & \partial B_x / \partial y & \partial B_x / \partial z \\ \partial B_y / \partial x & \partial B_y / \partial y & \partial B_y / \partial z \\ \partial B_z / \partial x & \partial B_z / \partial y & \partial B_z / \partial z \end{bmatrix} \\ & \times \begin{bmatrix} x_{21} & x_{31} & x_{41} \\ y_{21} & y_{31} & y_{41} \\ z_{21} & z_{31} & z_{41} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $B_{xi1}, B_{yi1}, B_{zi1}$ 为 i 号磁力仪与 1 号磁力仪 x, y, z 分量的差值, $(x_{i1} \ y_{i1} \ z_{i1})$ 为 i 号与 1 号磁力仪的位移差. 设 $\mathbf{B}_{i1} = \mathbf{B}_i - \mathbf{B}_1 = (B_{xi1} \ B_{yi1} \ B_{zi1})^T$, (4) 式可表示为

$$\begin{pmatrix} B_{21} & B_{31} & B_{41} \end{pmatrix} = \mathbf{G} \mathbf{a}, \quad (5)$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} x_{21} & x_{31} & x_{41} \\ y_{21} & y_{31} & y_{41} \\ z_{21} & z_{31} & z_{41} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} B_{21} & B_{31} & B_{41} \end{pmatrix} \mathbf{a}^{-1}, \quad (7)$$

(7) 式为四面体磁梯度张量系统的差分测量算法.

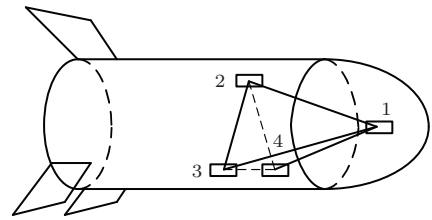


图 1 四面体磁梯度张量系统结构示意图

3 载体磁干扰数学模型

3.1 单个矢量磁力仪磁干扰数学模型

载体在运动过程中, 由于自身材料磁化和切割磁感线, 进而引起诸多干扰磁场的产生, 如载体固有磁场、感应磁场和涡流磁场等. 对于 UUV 载体其涡流磁场很小, 因此只需考虑固有磁场和感应磁场对磁传感器测量的影响.

载体的固有磁场是由载体的硬磁材料受外磁场磁化而产生的磁场, 由于硬磁材料具有高矫顽力和剩磁值, 所以一经磁化可以保留较长时间不易消失. 由于磁传感器和硬磁材料都是固连在载体上的, 所以不论载体姿态怎样变化, 固有磁场在磁传感器三个轴上的分量是恒定的. 载体的感应磁场是由载体的软磁材料被外磁场感应磁化产生的, 由于软磁材料具有较低的矫顽力和较窄的磁滞回线, 所以当外磁场改变时感应磁场也随之变化. 感应磁场的大小及方向与载体的姿态和位置有关. 以载体上捷联式磁传感器的三轴为空间直角坐标系的 x, y, z 轴建立载体坐标系, 则固有磁场在载体坐标系中可以表示为 $\mathbf{B}^h = (B_x^h \ B_y^h \ B_z^h)^T$. 根据泊松方程载体的感应磁场 $\mathbf{B}^s = (B_x^s \ B_y^s \ B_z^s)^T$ 可以表示为

$$\mathbf{B}^s = \mathbf{K} \mathbf{B}^b, \quad (8)$$

式中, $B^b = (B_x^b \ B_y^b \ B_z^b)^T$ 为背景磁场; $K_{3 \times 3}$ 为载体软磁感应系数, 载体一定时, K 为对称阵, 且各分量为常数.

综合分析载体的固有磁场和感应磁场干扰, 矢量磁力仪实际输出值的表达式为

$$B' = B + KB^b + B^h, \quad (9)$$

式中 B 为磁力仪的理论输出值. 因此磁梯度张量系统 i 号磁力仪的实际输出值表达式为

$$B'_i = B_i + K_i B^b + B_i^h, \quad (10)$$

式中 K_i 和 B_i^h 分别 i 号磁力仪位置点的载体软磁感应系数和固有磁场.

3.2 磁梯度张量磁干扰数学模型

根据 (10) 式 i 号磁力仪与 1 号磁力仪测量值的差可以表示为

$$\begin{aligned} B'_{i1} &= B'_i - B'_1 = B_{i1} + K_{i1} B^b + B_{i1}^h, \\ K_{i1} &= K_i - K_1, \\ B_{i1}^h &= B_i^h - B_1^h. \end{aligned} \quad (11)$$

根据 (7) 式磁梯度张量差分测量算法, 磁梯度张量系统的测量值表达式为

$$\begin{aligned} G_m &= (B'_{21} \ B'_{31} \ B'_{41}) a^{-1} \\ &= (B_{21} \ B_{31} \ B_{41}) a^{-1} \\ &\quad + (K_{21} B^b \ K_{31} B^b \ K_{41} B^b) a^{-1} \\ &\quad + (B_{21}^h \ B_{31}^h \ B_{41}^h) a^{-1} \\ &= G + (K_{21} B^b \ K_{31} B^b \ K_{41} B^b) a^{-1} \\ &\quad + (B_{21}^h \ B_{31}^h \ B_{41}^h) a^{-1}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中 G_m 和 G 分别为磁梯度张量系统的实际输出值和理论输出值, 根据 (12) 式, 磁梯度张量系统载体磁干扰的数学模型可以表示为

$$\begin{aligned} D &= G_m - G \\ &= (K_{21} B^b \ K_{31} B^b \ K_{41} B^b) a^{-1} \\ &\quad + (B_{21}^h \ B_{31}^h \ B_{41}^h) a^{-1}, \end{aligned} \quad (13)$$

式中 D 为载体磁干扰, K_{i1} 和 B_{i1}^h 分别 i 号磁力仪与 1 号磁力仪的软磁感应系数和固有磁场的差值.

4 载体磁干扰补偿方法

搭载于 UV 的四面体磁梯度张量系统中, 1 号磁力仪作为参考磁力仪, 放置于载体磁干扰最小的

位置测量背景磁场, 因此背景磁场 B^b 等于 1 号磁力仪的实际输出值 B'_1 [8]. 则 (13) 式可以表示为

$$\begin{aligned} D &= G_m - G \\ &= (K_{21} B'_1 \ K_{31} B'_1 \ K_{41} B'_1) a^{-1} \\ &\quad + (B_{21}^h \ B_{31}^h \ B_{41}^h) a^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

令

$$k = (K_{21} \ K_{31} \ K_{41})_{3 \times 9}, \quad (15)$$

$$B_{1m} = \begin{bmatrix} B'_1 & O_{3 \times 1} & O_{3 \times 1} \\ O_{3 \times 1} & B'_1 & O_{3 \times 1} \\ O_{3 \times 1} & O_{3 \times 1} & B'_1 \end{bmatrix}_{9 \times 3}, \quad (16)$$

$$b = (B_{21}^h \ B_{31}^h \ B_{41}^h). \quad (17)$$

载体磁干扰可以表示为

$$D = (k B_{1m} + b) a^{-1}. \quad (18)$$

磁梯度张量系统的载体磁干扰补偿公式可以表示为

$$G = G_m - D = G_m - (k B_{1m} + b) a^{-1}, \quad (19)$$

式中, G_m 和 B_{1m} 为磁梯度张量系统的输出量, k 和 b 为补偿参数, a 为磁梯度张量系统的已知参数. 对于搭载磁梯度张量系统的载体, 补偿参数 k 和 b 为常数, 因此在已知补偿参数的条件下, 可以利用补偿 (19) 式实现磁梯度张量系统的载体磁干扰补偿. 由于 K_{i1} 为对称阵, 因此 k 中有 18 个未知分量, b 中有 9 个未知分量, 一共 27 个未知量.

5 补偿参数的辨识方法

载体磁干扰补偿后的磁梯度张量 G 应满足 (2) 式和 (3) 式, 根据 (13) 式可以得到 G_m 和 D 各分量的关系式如下:

$$\begin{aligned} G_{m12} - D_{12} &= G_{m21} - D_{21}, \\ G_{m13} - D_{13} &= G_{m31} - D_{31}, \\ G_{m23} - D_{23} &= G_{m32} - D_{32}, \\ G_{m11} + G_{m22} + G_{m33} &= D_{11} + D_{22} + D_{33}. \end{aligned} \quad (20)$$

设函数

$$\begin{aligned} f(k, b) &= ((G_{m12} - G_{m21}) - (D_{12} - D_{21}))^2 \\ &\quad + ((G_{m13} - G_{m31}) - (D_{13} - D_{31}))^2 \\ &\quad + ((G_{m23} - G_{m32}) - (D_{23} - D_{32}))^2 \\ &\quad + ((G_{m11} + G_{m22} + G_{m33}) \end{aligned}$$

$$-(D_{11} + D_{22} + D_{33})^2, \quad (21)$$

$$F(\mathbf{k}, \mathbf{b}) = \sum_{i=1}^m f_i(\mathbf{k}, \mathbf{b}). \quad (22)$$

补偿参数 \mathbf{k} 和 \mathbf{b} 的估计可以转化为函数的优化问题, 即求一组 \mathbf{k} 和 \mathbf{b} 使得函数 $F(\mathbf{k}, \mathbf{b})$ 取得最小值. 即

$$\begin{aligned} & \min F(\mathbf{k}, \mathbf{b}), \\ & \text{s.t.} : k_{ij}^s \leq k_{ij} \leq k_{ij}^t, b_{ij}^s \leq b_{ij} \leq b_{ij}^t. \end{aligned} \quad (23)$$

对于一般的铁磁性载体补偿参数 \mathbf{k} 和 \mathbf{b} 各分量的取值范围为 $0 \leq k_{ij} \leq 0.01, 0 \leq b_{ij} \leq 10$. 针对该函数优化需要求解参数较多的问题, 本文提出利用遗传算法求解该函数优化问题.

遗传算法控制参数分别取值为: 群体规模 $N = 30$, 与每一变量对应的基因段长度为 $n = 10$, 复制概率 $p_r = 0.9$, 交叉概率 $p_c = 0.8$, 变异概率 $p_m = 0.8$.

6 实验与结果分析

6.1 载体磁干扰参数设定

设 UUV 载体搭载四面体结构的磁梯度张量系统, 磁梯度张量系统的四个矢量磁力仪位置点的软磁感应系数 \mathbf{K}_i 和固有磁场 \mathbf{B}_i^h 分别为

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.02 & 0.03 \\ 0.02 & 0.01 & 0.005 \\ 0.03 & 0.005 & 0.02 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 0.501 & 0.0202 & 0.0301 \\ 0.0202 & 0.1 & 0.005 \\ 0.0301 & 0.005 & 0.2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.0202 & 0.03 \\ 0.0202 & 0.101 & 0.0051 \\ 0.03 & 0.0051 & 0.2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.02 & 0.0303 \\ 0.02 & 0.1 & 0.0051 \\ 0.0303 & 0.0051 & 0.202 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_1^h = (4 \ 6 \ 9) \text{ nT},$$

$$\mathbf{B}_2^h = (13 \ -4 \ -6) \text{ nT},$$

$$\mathbf{B}_3^h = (10 \ -5 \ 2) \text{ nT},$$

$$\mathbf{B}_4^h = (-5 \ 11 \ 6) \text{ nT}.$$

6.2 仿真流程

仿真实验利用磁梯度张量系统测量磁性目标的周围磁场. 设磁性目标可以假定为磁偶极子, 目标磁矩在空间坐标系中三分量为 $(4 \times 10^6, 0, 0) \text{ Am}^2$. 仿真实验流程如下:

1) 利用磁偶极子磁场数学模型计算出空间测量点的磁梯度张量理论值.

2) 利用本文提出的载体磁干扰数学模型 (13) 式和仿真实验设定的磁干扰参数, 计算出空间测量点的各误差项, 然后加入到磁梯度张量理论值中得到补偿前的磁梯度张量值.

3) 利用前 30 个测量点的补偿前磁梯度张量值, 根据本文提出的补偿参数辨识方法, 求取补偿参数 \mathbf{k} 和 \mathbf{b} 的估计值如下:

$$\hat{\mathbf{b}} = \begin{bmatrix} 8.36 & -9.23 & -13.16 \\ 6.31 & -12.26 & -7.35 \\ -8.89 & 4.59 & -2.54 \end{bmatrix} \text{ nT},$$

$$\hat{\mathbf{k}} = \begin{bmatrix} 0.00181 & 0.00029 & 0.00025 & 0.00001 & 0.00029 & 0 & 0.00002 & 0.00001 & 0.00038 \\ 0.00029 & 0 & 0.00001 & 0.00029 & 0.00144 & 0.00017 & 0.00001 & 0 & 0.00017 \\ 0.00025 & 0.00001 & 0 & 0 & 0.00017 & 0 & 0.00038 & 0.00017 & 0.00313 \end{bmatrix}.$$

4) 利用补偿参数的估计值 $\hat{\mathbf{k}}, \hat{\mathbf{b}}$ 和本文提出的载体磁干扰补偿 (19) 式, 对后 200 个测量点的补偿前仿真数据进行磁干扰补偿得到补偿后的磁梯度张量值. 仿真结果如图 2 所示.

图 2 为补偿前和补偿后的磁梯度张量 F 范数的比较. 分析仿真结果可知, 载体磁干扰对磁梯度

张量测量影响很大, 可以导致几百 nT/m 的测量误差; 补偿后的磁梯度张量值与理论值的差别很小. 因此本文提出的补偿方法可以有效补偿四面体磁梯度张量系统的载体磁干扰. 根据误差统计下式计算得出, 该方法可以补偿磁梯度张量测量值中 95.9% 的载体磁干扰:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\|\mathbf{G}_a\|_F - \|\mathbf{G}_l\|_F}{\|\mathbf{G}_b\|_F - \|\mathbf{G}_l\|_F} \right|, \quad (24)$$

式中 $\|\mathbf{G}_l\|_F$ 为磁梯度张量理论值的 F 范数, $\|\mathbf{G}_b\|_F$ 和 $\|\mathbf{G}_a\|_F$ 分别为补偿前和补偿后的磁梯度张量的 F 范数.

本文提出的补偿方法与文献 [8] 提出的方法进行比较得到的结果如图 3 所示. 文献 [8] 的补偿方法将四面体磁梯度张量系统中一个矢量磁力仪作为参考磁力仪补偿其他三个矢量磁力仪, 没有加入磁梯度张量本身的特征约束, 从而限制了磁干扰的补偿效果. 根据统计 (24) 式, 图 3 的仿真结果中文献 [8] 的方法可以补偿 85.7% 的磁干扰, 本文方法的补偿效果优于文献 [8] 的方法.

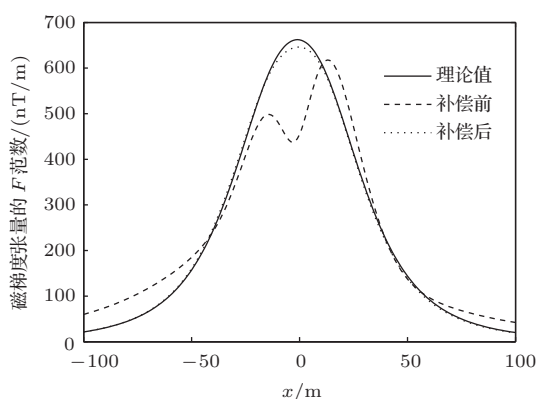


图2 补偿前和补偿后磁梯度张量 F 范数的比较

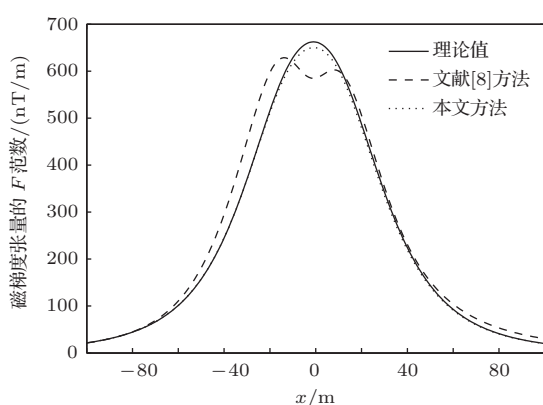


图3 本文方法与文献 [8] 方法的比较

7 结 论

针对 UUV 载体磁干扰严重影响磁梯度张量系统测量值的问题, 本文在载体感应磁场和固有磁场

产生机理的基础上, 通过理论研究建立了磁梯度张量系统载体磁干扰数学模型, 并提出了磁干扰补偿方法和补偿参数辨识方法. 并通过仿真实验对方法进行了验证, 实验结果表明该方法可以有效补偿磁梯度张量系统的载体磁干扰. 该方法的不足在于补偿参数的未知量太多, 求取过程复杂, 且精度不高. 在下一步的工作中需要研究其他优化算法求解补偿参数, 以更好的提高载体磁干扰补偿效果.

参考文献

- [1] Stolz R, Zakosarenko V, Schulz M 2006 *The Leading Edge* **25** 178
- [2] Keene M N, Exon N J, Satchell J S 1999 *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **9** 3048
- [3] Yang Y T, Shi Z Y 2008 *Acta Armamentarii* **29** 1485 (in Chinese) [杨云涛, 石志勇 2008 兵工学报 **29** 1485]
- [4] Tolles W E, Mineola N Y 1995 *US Patent* 2 706 801 [1955-04-19]
- [5] He Y Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 217502 (in Chinese) [何永周 2013 物理学报 **62** 217502]
- [6] Jiang F Y, Wang N, Jin Y R, Deng H, Tian Y, Lang P L, Li J, Chen Y F, Zheng D N 2013 *Chin. Phys. B* **22** 047401
- [7] Allen G, Sulzberger G, Bono J T, Pray J S, Clem T R 2005 *Proceedings of the OCEANS'05 MTS/IEEE Conference Washington DC, US Republic, September 17-23, 2005* p1956
- [8] Pei Y H, Yeo H G 2009 *Proceedings of the OCEANS'09 MTS/IEEE Conference Biloxi, Mississippi Republic, October 26-29, 2009* p1
- [9] Pei Y H, Yeo H G 2006 *Proceedings of the OCEANS'06 MTS/IEEE Conference Singapore Republic, September 18-21, 2006* p1
- [10] Bono J T, Overway D J, Wynn W M 2013 *Proceedings of the OCEANS'03 MTS/IEEE Conference San Diego, California Republic, September 22-26, 2003* p2018
- [11] Yang X Y, Huang S G 2004 *Chin. J. Sci. Instrum.* **25** 466 (in Chinese) [杨新勇, 黄圣国 2004 仪器仪表学报 **25** 466]
- [12] Chen D X, Pan M C, Luo F L 2006 *Chin. J. Sens. Actuators* **19** 642 (in Chinese) [陈棣湘, 潘孟春, 罗飞路 2006 传感技术学报 **19** 642]
- [13] Fitzgibbon A W, Pilu M, Fisher R B 1999 *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **21** 476
- [14] Zhang X M, Zhao Y 2009 *Chin. J. Sci. Instrum.* **30** 2438 (in Chinese) [张晓明, 赵剡 2009 仪器仪表学报 **30** 2438]
- [15] Khurana K K, Kepko E L, Kivelson M G, Elphic R C 1996 *IEEE Transactions on Magnetics* **32** 5193

A vehicle magnetic noise compensation method for the tetrahedron magnetic gradiometer*

Yu Zhen-Tao^{1)†} Lü Jun-Wei¹⁾ Bi Bo¹⁾ Zhou Jing²⁾

1) (Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

2) (Naval Unit 92474, Sanya 572018, China)

(Received 7 January 2014; revised manuscript received 15 February 2014)

Abstract

The magnetic noise of a vehicle has a strong impact on the magnetic gradiometer, so a vehicle magnetic noise compensation method is proposed. Based on the production mechanism of the vehicle magnetic noise, a mathematic model for vehicle magnetic noise on the tetrahedron magnetic gradiometer is proposed, in which the difference algorithm of the magnetic gradiometer is used to fuse the magnetic noise of each vector magnetometer. In terms of this mathematic model, we propose the noise compensation algorithm and the compensation coefficients recognition method by using the mathematic relations of the 9 components of the magnetic gradient tensor. Simulation results show that the proposed method can efficiently compensate 95.9% vehicle magnetic noise on the magnetic gradiometer. This method can compensate vehicle magnetic noise on the magnetic gradiometer output directly by the compensation coefficients, and realize the holistic noise compensation of the magnetic gradiometer theoretically.

Keywords: magnetic field, magnetic gradient tensor, magnetic sensor, error compensation

PACS: 07.55.Ge, 52.70.Ds

DOI: [10.7498/aps.63.110702](https://doi.org/10.7498/aps.63.110702)

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2010AAJ211).

† Corresponding author. E-mail: hjhyzt@163.com