

多目标位置信息场直接定位法

马贤同, 罗景青, 孟祥豪

电子工程学院, 安徽 合肥 230037

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60801044)

通信作者: 马贤同, mxtzhy@foxmail.com 收稿/录用/修回: 2014-10-13/2015-01-08/2015-05-22

摘要

针对现有的多目标位置信息场定位法均采用先测量参数再进行定位的方法, 提出一种直接利用采样数据进行定位的多目标位置信息场直接定位法. 该方法直接利用时域或频域采样数据在各个观测站进行目标位置信息场计算, 然后对计算结果在定位中心进行融合处理得到多个目标的位置信息, 无需测量目标的 DOA 等参数, 避免了直接定位法中向定位中心传输大量的信号数据问题. 最后, 通过计算机仿真实验验证该方法在低信噪比时定位性能优于采用 DOA 进行定位的传统位置信息场定位法, 且性能更为稳定.

关键词

采样数据
位置信息场定位法
多目标
直接定位
中图分类号: TN911.7
文献标识码: A

Position Information Field Direct Position Determination for Multiple Targets

MA Xiantong, LUO Jingqing, MENG Xianghao

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China

Abstract

Existing position information field location methods for multiple targets first measure the parameters and then locate the targets. We propose a location method, called the position information field direct position determination for multiple targets, which is based directly on sampling data. This method uses time- or frequency-domain sampling data to directly calculate the position information field for each observation, and the calculated results are then sent to the location center to obtain the position of multiple targets through fusion processing. This method requires no measurement of target parameters, such as the direction of arrival (DOA). Compared with the direct position determination (DPD) method, our proposed method avoids the need to transmit a large volume of signal data to the location center. The simulation results show that the proposed method's positioning performance is superior to that of the traditional position information field location method that uses DOA, and has a low signal-to-noise ratio (SNR) and a more stable performance.

Keywords

sampling data;
position information field
location method;
multiple targets;
direct position determination

1 引言

无源定位具有很好的隐蔽性, 不易受到干扰和攻击, 它在军事及民事等方面得到了广泛应用^[1-5]. 传统的定位技术有到达角 (direction of arrival, DOA) 定位^[6-7]、到达时间 (time of arrival, TOA) 定位^[8-9] 和到达时间差 (time difference of arrival, TDOA) 定位^[10-11] 等. 这些方法首先通过接收的信号测量定位所需的一种或多种观测量 (如角度、相位差变化率^[12] 等), 然后利用这些观测量进行定位解算得到目标辐射源的位置.

为了得到高精度的观测量估计值, 有时需要复杂的定位系统和估计算法^[13], 加之复杂的电磁环境, 可能会出现观测量估计结果不理想甚至错误. 为此, Weiss^[14-15] 提出

无需测量参数估计直接利用信号估计辐射源位置的直接定位 (direct position determination, DPD) 方法. 由于 DPD 方法无需进行测量参数估计, 且在低信噪比条件下优于需要进行参数估计的定位方法, 得到了国内外学者的广泛关注^[16-18]. 但 DPD 方法需要向定位中心传输大量的信号数据, 传输压力较大.

目标位置信息场 (position information field, PIF) 定位法^[19] 在处理多目标定位问题时能够同时确定目标数目和多目标位置, 对传感器测量数据具有较好的融合性能. 受 DPD 方法的启示, 提出一种直接利用采样数据进行定位的多目标位置信息场直接定位法. 本文首先介绍一般的目标位置信息场定位法; 然后建立利用采样数据进行目标位置信息场定位法的模型; 最后进行仿真, 并对比本文方法与

采用 DOA 参数进行定位的目标位置信息场定位法的定位性能。

2 目标位置信息场定位法

在对辐射源目标进行定位的过程中,传统的方法是首先获得关于目标的测量数据,然后将测量数据按某个确定目标进行分类。如果不能做到这一点,定位将难以进行。而在实际应用中,有时这一前提条件不能得到满足。对目标定位而言,目标的位置是最终要得到的信息,而目标的位置是分布于一定区域内的。定义在指定区域内关于感兴趣目标或目标群位置分布的函数为目标位置信息场函数,它是一个标量场,是关于目标或目标群位置分布特征的一个描述。从目标位置信息场函数中分析出目标的个数和各个目标位置的方法,称之为目标位置信息场定位分析法,简称目标位置信息场定位法或位置信息场定位法^[15]。

设目标位于 x 的先验概率密度为 $p_0(x)$,则可定义目标位置信息场为

$$f_x(x/Z) = \ln p_0(x) - \sum_{m=1}^M C[d(z_m, h_m(x))] \quad (1)$$

其中, $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_M\}$ 为观测数据的集合, M 为总的观测次数, $m = 1, 2, \dots, M$, $C[\cdot]$ 为代价函数, $h_m(x)$ 是目标位置 x 的确定性函数矢量,为目标对应于测量 z_m 无噪声时的“响应”,而

$d(z_m, h_m(x)) = [(z_m - h_m(x))^H R_m^{-1} (z_m - h_m(x))]^{1/2}$ (2) 是观测矢量 z_m 与场内点 x 处目标响应 $h_m(x)$ 的标称化距离(欧氏距离),其中, R_m 为噪声的协方差矩阵。代价函数有多种,下面对其中 3 种进行介绍。

对于定位系统而言,在某一特定的位置 x ,观测站通过测量、计算等手段可以得到关于该位置的某个测量参数 z 。然而,当目标和观测站位置都确定时,观测站可以得到关于该目标的一组理论数据 $h(x)$,简记为 h ,可见 z 是 h 的估计值。估计误差可表示为

$$e(z) = z - h \quad (3)$$

若假定代价函数为估计误差的平方,则代价函数可定义为

$$C(z) = (z - h)^2 \quad (4)$$

当 $|z - h| \geq \gamma$ 且 $\gamma > 0$ 时,令 $C(z) = \gamma^2$, γ 为门限,称此时的代价函数为二次代价函数。

若假定代价函数为估计误差绝对值,则代价函数可定义为

$$C(z) = |z - h| \quad (5)$$

当 $|z - h| \geq \gamma$ 且 $\gamma > 0$ 时,令 $C(z) = \gamma$,称此时的代价函数为绝对值代价函数。

若将代价函数规定为如下形式:

$$C(z) = \begin{cases} 0, & |z - h| < \gamma \\ 1, & |z - h| \geq \gamma \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\gamma > 0$,称此时的代价函数为均匀代价函数。

若测量噪声服从高斯分布,一般认为测量数据也服从高斯分布,记为 $N(\mu, \sigma^2)$ 。根据高斯分布的特征, μ 反应高斯分布的集中趋势位置, σ 反应数据分布的离散程度。

σ 越大,数据分布越分散; σ 越小,数据分布越集中。由于服从高斯过程的数据标准差大部分集中于 3σ 以内,可令 $\gamma = 3\sigma$,仍然采用类似二次代价函数的形式,则高斯过程的代价函数可定义为

$$C(z) = \begin{cases} (z - h)^2 / 2, & |z - h| < \gamma \\ \gamma^2 / 2, & |z - h| \geq \gamma \end{cases} \quad (7)$$

称此时的代价函数为有限平方代价函数。在定位过程中,对目标进行测量的同一类型的大量参数可以认为是高斯分布的,不失一般性,在后文的讨论过程中均假定测量数据服从高斯分布。

3 目标位置信息场直接定位法

假设无源定位系统包含 M 个观测站,分别位于 $q_m = (x_m, y_m)$ ($m = 1, 2, \dots, M$)。每个观测站均装有 L 阵元的线型阵列天线,用于接收辐射源目标的信号。对每个观测站,选定一个参考阵元,设第 m 个观测站的第 l 个阵元布置在 $x_{m,l}$ ($l = 0, 1, \dots, L-1$) 处,则该观测站的阵元位置矢量序列为 $x_{m,1}, x_{m,2}, \dots, x_{m,L}$ 。

现在用这一无源定位系统对某一区域范围内的 Q 个辐射源目标进行定位,目标的位置为 $p_q = (x_q, y_q)$ ($q = 1, 2, \dots, Q$)。第 m 个观测站各个阵元接收到的信号可表示为

$$y_m(t) = \sum_{q=1}^Q a_{m,q} s_q(t - \tau_{m,q}) + n_m(t) \quad (8)$$

其中, $a_{m,q}$ 为第 m 个观测站接收第 q 个信号的天线阵列响应, $s_q(t - \tau_{m,q})$ 为第 q 个信号经过时延 $\tau_{m,q}$ 传输到第 m 个观测站时的信号, $n_m(t)$ 为噪声。 $a_{m,q}$ 与观测站位置、目标位置和信号波长有关,假设观测站上的阵列布局与目标的关系如图 1 所示,图中 φ_q 为目标相对于观测站的到达角参数,则 $a_{m,q} = [e^{j r_{m,q,0}} \ e^{j r_{m,q,1}} \ \dots \ e^{j r_{m,q,L-1}}]^T$, 其中, $r_{m,q,l} = \frac{2\pi x_{m,l}(x_q - x_m)}{\lambda \|p_q - q_m\|}$, λ 为信号波长, $\|\cdot\|$ 为求模运算。式中并没有直接出现 φ_q ,而是将到达角度信息转化为了观测站位置和目标位置信息,进而可以实现不进行到达角估计而直接采用观测信号作位置估计。

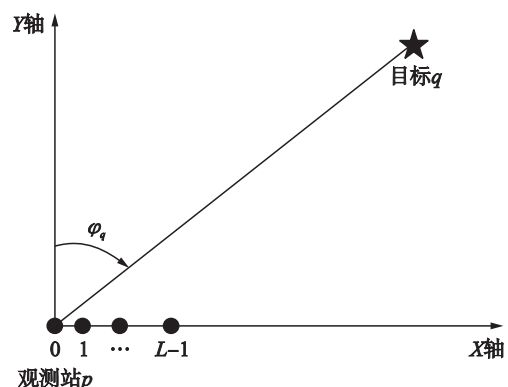


图1 阵列与目标布局

Fig.1 Array and the target distribution diagram

将式(8)写成矩阵形式:

$$Y_m = A_m S + N_m \quad (9)$$

其中, $A_m = [a_{m,1} \ a_{m,2} \ \cdots \ a_{m,Q}]$, $S = [s_1(t - \tau_{m,1}) \ s_2(t - \tau_{m,2}) \ \cdots \ s_Q(t - \tau_{m,Q})]^T$, $Y_m = y_m(t)$, $N_m = n_m(t)$.

阵列信号输出矩阵 Y_m 的自相关矩阵为

$$\begin{aligned} G_m &= E[Y_m Y_m^H] \\ &= E[(A_m S + N_m)(A_m S + N_m)^H] \\ &= A_m P A_m^H + \sigma_m^2 I \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $(\cdot)^H$ 表示向量或矩阵共轭转置操作, $P = E[SS^H]$ 为信号自相关矩阵, σ_m^2 为第 m 个观测站各阵元噪声的方差, I 为单位矩阵. 式(10)中, 自相关矩阵 G_m 是一个 $L \times L$ 的对称矩阵. 对矩阵 G_m 求特征值并得到与特征值相应的特征向量. 在矩阵 G_m 的特征值中, 一部分的值相对较大, 另一部分则相对较小. 将前一部分特征值集合的特征向量扩展成信号子空间 $[E_s]_{L \times Q}$; 将后一部分特征值集合的特征向量扩展成噪声子空间 $[E_N]_{L \times (L-Q)}$. 多重信号分类 (MUSIC) 测向算法实质就是用矩阵 A_m 在噪声子空间 E_N 中的最小投影方向作为信号来波方向的估计. 因此, 运用式(11)搜索得到目标的个数以及各个目标的到达方向.

$$C_{\text{MUSIC}} = \max_{\varphi_q} \frac{1}{A_m^H E_N E_N^H A_m} \quad (11)$$

将这种先测量 DOA 参数再进行位置信息场定位的方法记为 PIF-DOA 方法, 但是这种“两步”定位法并不是最优的, Weiss^[11] 提出可以无需进行参数测量直接利用信号估计辐射源位置, 直接利用信号进行位置信息场定位的定位模型为

$$z_m = \sqrt{A_m^H E_N E_N^H A_m} = \|A_m^H E_N\| \quad (12)$$

由于 A_m 落入信号子空间内, 根据信号子空间与噪声子空间的正交性, z_m 无噪声时的“响应” $h_m(x)$ 为 0, 由于信号子空间和噪声子空间都是通过估计得到的, z_m 通常很小. 此时,

$$d(z_m, h_m(x)) = (z_m^H R_m^{-1} z_m)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

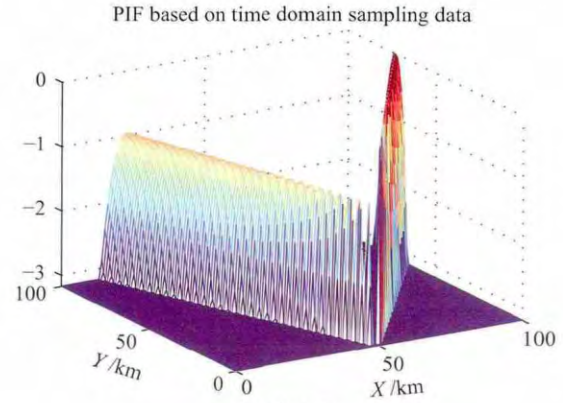
当某一区域存在多个目标时, 各个目标到达观测站的距离往往是不一样的, 各个目标信号的衰减和受噪声的影响也是不同的. 对于同一个观测站, 常假定 R_m 对各个目标是相同的, 这时采用式(12)的 PIF-DPD 定位模型进行目标位置信息场计算可能会得到幅度不一致的目标位置信息场, 从而导致一个目标的目标位置信息场幅度比另一个目标高出许多, 若每个观测站都是如此, 则可能会丢失幅度低的目标, 定位失效. 为此, 将式(12)修正为

$$z_m = \left\| \frac{A_m^H E_N}{\|E_N\|} \right\| \quad (14)$$

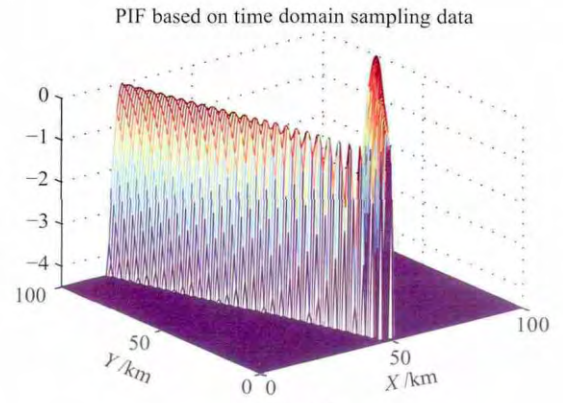
假定观测站位于 (50, 0) km 处, 两个目标分别位于 (30, 70) km 和 (70, 30) km, 信噪比 SNR = 0 dB, 修正前和修正后的目标位置信息场如图 2(a) 和图 2(b) 所示.

同样可以用频域采样信号进行位置信息场定位, 为便于区别, 将利用时域信号进行位置信息场直接定位的方法记为 PIF-TDPD, 将利用频域信号进行位置信息场直接定位的方法记为 PIF-FDPD. PIF-FDPD 的具体实现为先将时域信号进行 FFT, 得到频域信号:

$$F_m = \text{FFT}(Y_m) \quad (15)$$



(a) 修正前



(b) 修正后

图2 修正前后的目标位置信息场对比图

Fig.2 Target position information field contrast figures before and after correction

阵列输出频域信号 F_m 的自相关矩阵为

$$G'_m = E[F_m F_m^H] = A'_m P (A'_m)^H \quad (16)$$

其中, A'_m 为阵列响应, P 相当于阵列输入频域信号的自相关矩阵, 此时张成的噪声子空间记为 $[E'_N]_{L \times (L-Q)}$, 则

$$z_m = \left\| \frac{(A'_m)^H E'_N}{\|E'_N\|} \right\| \quad (17)$$

4 仿真分析

假设定位系统包含 3 个观测站, 设观测站等间距分布, 观测站的间距 $D = 50$ km, 位置分别为 (0, 0) km, (D , 0) km 和 ($2D$, 0) km, 每个观测站均装有 8 阵元的一维均匀线阵, 阵元间距为 5 cm, 用于接收辐射源目标的信号. 观测站接收机的采样频率 f_s 设置为 100 MHz, 则采样间隔为 $t_s = 1/f_s$; 采样时间设置为 10.24 μ s, 则采样点数 N 为 1 024. 光速 c 为 3×10^8 m/s. 2 个等功率同类辐射源信号的位置分别为 (30.4, 70.6) km 和 (70.6, 30.4) km, 信号在水平方向上.

设 2 个信号均为线性调频信号, 第 1 个信号的脉宽 $\tau = 4 \times 10^{-6}$ s, 重复周期 $T = 500 \times 10^{-6}$ s, 带宽 $B = 20$ MHz, 中心频率 $f = 3\ 000$ MHz; 第 2 个信号的脉宽 $\tau = 6 \times 10^{-6}$ s, 重复周期 $T = 500 \times 10^{-6}$ s, 带宽 $B = 30$ MHz, 中心频率 $f = 3\ 040$ MHz.

在对采样数据进行位置信息场计算时, 认为不同观测

站噪声的协方差矩阵是相同的,且为一个标量,记为 R ,令 $R = a \times \sqrt{5/4N \times 10^{\frac{SNR}{10}}}$, a 为一个系数.以 PIF-TDPD 为例,设信噪比 SNR = 0 dB,网格的搜索步长在 X 轴和 Y 轴方向均为 0.5 km,当 a 分别取 1、2、3 时采用位置信息场定位的效果图如图3所示.通过比较发现,随着 a 的增大,

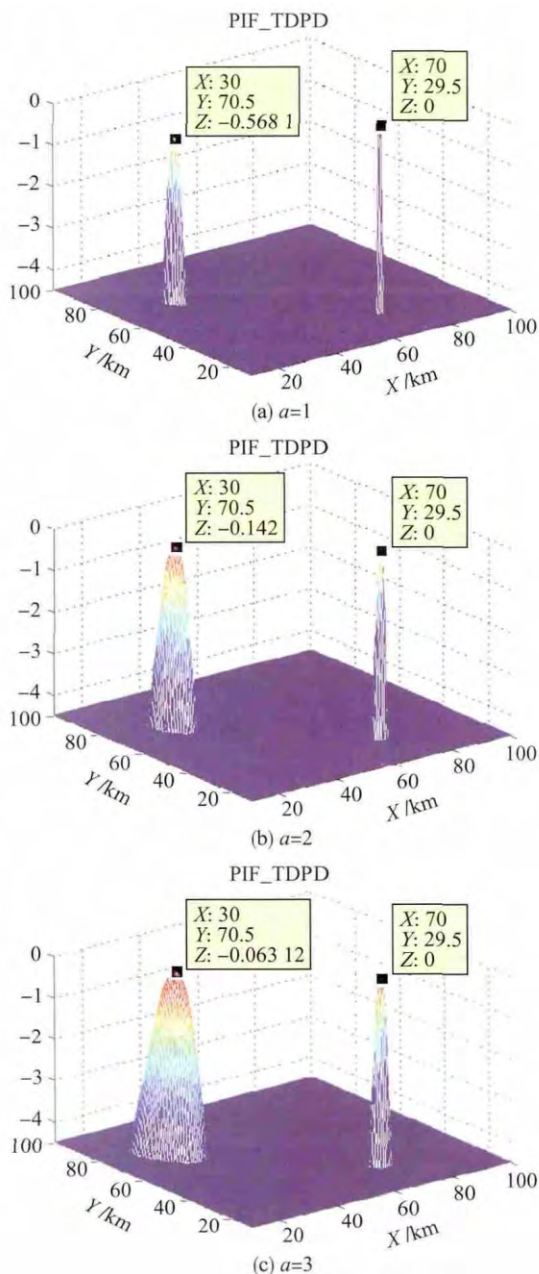


图3 估计的噪声协方差矩阵对目标位置信息场定位的影响

Fig.3 The impact of the estimated noise covariance matrix to target position information field positioning

估计的噪声方差变大,两个目标的分辨性能变差,但估计的两个目标的位置没有改变,即目标的定位结果对 a 的变化不敏感.

上述结果只是通过一次定位获得的,为了统计对多个目标的定位性能,采用 $N = 100$ 次蒙特卡罗^[20]重复实验统计定位算法的均方根误差(root mean square error, RMSE)为

$$RMSE(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^Q \|p_q - \hat{p}_q(n)\|^2} \quad (18)$$

式中, $\hat{p}_q(n)$ 为第 n 次估计的第 q 个目标的位置, N 为蒙特卡罗仿真次数.图4为100次蒙特卡罗实验得到的RMSE随信噪比的变化关系.从图中可知,在高信噪比条件下,PIF-DOA方法、PIF-TDPD方法和PIF-FDPD方法定位性能相似;在低信噪比条件下,PIF-TDPD方法和PIF-FDPD方法的定位性能优于PIF-DOA方法;仿真中PIF-TDPD方法和PIF-FDPD方法所加的噪声是相同的,所以在相同信噪比条件下,它们的定位性能也是一样的.

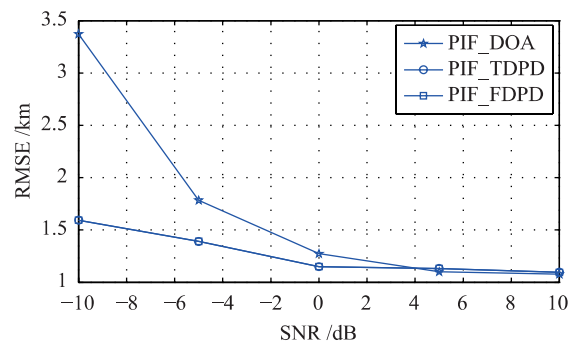


图4 不同信噪比条件下定位误差曲线

Fig.4 Positioning error curves under different SNRs

5 总结

本文提出一种直接利用采样数据进行定位的多目标位置信息场直接定位法,扩展了多目标位置信息场定位法的应用范围.该方法直接利用采样数据在各个观测站进行目标位置信息场计算,然后对计算结果在定位中心进行融合处理得到多个目标的位置信息.由于无需测量目标的参数信息,避免了参数测量带来的测量误差,定位性能更优,在低信噪比时尤为明显;由于位置信息场定位计算可以在各个观测站独立完成,接收到数据的多观测站可同时处理,只需向定位中心传输位置信息场定位结果即可,在数据量较大时减轻了DPD方法的数据传输压力.需要指出的是,该方法也可以像DPD方法那样将采样数据都传送到定位中心进行统一处理.

参考文献

- [1] Kulpa K S, Czekala Z. Masking effect and its removal in PCL radar[J]. IEEE Proceedings Radar Sonar and Navigation, 2005, 152(3): 174-178.
- [2] Lui K W K, Chan F K W, So H C. Accurate time delay estimation based passive localization[J]. Signal Processing, 2009, 89: 1835-1838.
- [3] 郭福成,樊昀,周一宇,等.空间电子侦察定位原理[M].北京:国防工业出版社,2012: 81-86.

Guo F C, Fan Y, Zhou Y Y, et al. Localization principles in space electronic reconnaissance[M]. Beijing: National Defense Industry Press,

- 2012: 81 – 86.
- [4] Bindhu S K H, Krishna P P M. Geolocation using TDOA and FDOA measurements in sensor networks using non-Linear elements[J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2014, 14(1): 35 – 39.
- [5] 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 G, Chen J. A clustering detection algorithm of stationary target for passive time difference location system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(3): 728 – 731.
- [6] Huang W P, Xu Y, Wang J. An intermediary method used in direction-finding location system[C]//2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 299 – 303.
- [7] Lee J Y, Hudson R E, Yao K. Acoustic DOA estimation: An approximate maximum likelihood approach[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(1): 131 – 141.
- [8] Wang Y, Ma S, Chen C. TOA-based passive localization in quasi-synchronous networks[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(4): 592 – 595.
- [9] Shen J Y, Molisch A, Salmi J. Accurate passive location estimation using TOA measurements[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(6): 2182 – 2192.
- [10] Picard J S, Weiss A J. Time difference localization in the presence of outliers[J]. Signal Processing, 2012, 92(10): 2432 – 2443.
- [11] Kay S, Vankayalapati N. Improvement of TDOA position fixing using the likelihood curvature[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(8): 1910 – 1914.
- [12] 李望西, 黄长强, 王勇, 等. 利用相位差变化率的机载无源定位跟踪改进算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 68 – 73.
Li W X, Huang C Q, Wang Y, et al. An improved airborne passive location & tracking algorithm using the rate-of-change of phase difference[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 68 – 73.
- [13] 郑恩明, 丘颜, 孙长瑜, 等. 三元阵被动定位中时延差估计算法研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 639 – 644.
Zheng E M, Qiu Y, Sun C Y, et al. Investigation on time delay difference estimation for three-element array passive positioning[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(3): 639 – 644.
- [14] Weiss A J. Direct position determination of narrowband radio frequency transmitters[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(5): 513 – 516.
- [15] Weiss A J. Direct geolocation of wideband emitters based on delay and doppler[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2011, 59(6): 2513 – 2521.
- [16] 王帆, 柯炜. 一种基于 RBF 神经网络辅助的直接定位新方法[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2011, 11(2): 79 – 83.
Wang F, Ke W. A new method of direct position determination based on RBF neural network [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2011, 11(2): 79 – 83.
- [17] 张敏, 郭福成, 周一宇. 基于单个长基线干涉仪的运动单站直接定位[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 378 – 386.
Zhang M, Guo F C, Zhou Y Y. A single moving observer direct position determination method using a long baseline interferometer[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 378 – 386.
- [18] Pourhomayoun M, Fowler M L. Distributed computation for direct position determination emitter location[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(4): 2878 – 2889.
- [19] 马贤同, 罗景青, 张奎. 面向 DOA 测量的多目标位置信息场定位法[J]. 信号处理, 2013, 29(1): 121 – 126.
Ma X T, Luo J Q, Zhang K. A location method for multi-target by position information field based on DOA[J]. Signal Processing, 2013, 29(1): 121 – 126.
- [20] Bevrani H, Shevtsova I G. Representativeness of a sample in monte carlo method[J]. Journal of Mathematical Sciences, 2015, 205(1): 27 – 33.

作者简介

马贤同(1987 –), 男, 博士生. 研究领域为空间信息处理理论与技术.

罗景青(1957 –), 男, 教授. 研究领域为空间信息处理, 阵列信号处理, 电子对抗信息处理.

孟祥豪(1987 –), 男, 博士生. 研究领域为雷达与雷达对抗理论新技术.