

基于前导脉冲信号的到达时间精确度分析

官峰勋*, 曹雅茹

中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 为提高定位系统的定位精确度,提出一种前导四脉冲信号差分匹配滤波器到达时间(TOA)估计算法。使用双脉冲和四脉冲信号评估差分匹配滤波器,该算法提高了前导脉冲信号 TOA 估计精度。从脉冲个数、信噪比(SNR)角度对差分匹配滤波器输出的方均根误差进行对比,得到四脉冲信号 TOA 估计精确度优于单脉冲信号的结论。在 SNR 为 20 dB 时,四脉冲信号的 TOA 估计精确度达 3.8947 ns,远低于国际民航组织规定的时间误差精确度最大值 25 ns。天津机场终端区设置的 ADS-B 接收机接收到的实时数据和同等条件下的仿真数据均验证了所提算法 TOA 估计的精确度和稳定性。

关键词 信号处理; 差分匹配滤波器; 前导脉冲信号; 到达时间; 精确度

中图分类号 V351.37; TN959.6; TN919.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.210704

Analysis of Time of Arrival Accuracy Based on Preamble Pulse Signals

Gong Fengxun*, Cao Yaru

College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract To improve the positioning accuracy of positioning systems, a time of arrival (TOA) estimation algorithm based on a preamble four-pulse signal differential matched filter is proposed. Using the two-pulse and four-pulse signals to evaluate the differential matched filter, the TOA estimation accuracy of preamble pulse signals is improved. Based on the number of pulses and a signal-to-noise ratio (SNR), the root mean square error of the differential matched filter output is compared, it is concluded that the TOA estimation accuracy of four-pulse signals is better than that of single-pulse signals. When the SNR is 20 dB, the TOA estimation accuracy of the four-pulse signals can reach 3.8947 ns, which is much lesser than the maximum time error accuracy of 25 ns specified by the International Civil Aviation Organization. Real-time data received by an ADS-B receiver installed at the terminal of Tianjin Airport and simulation data under the same conditions are used to verify the accuracy and stability of the TOA estimation of proposed algorithm.

Key words signal processing; differential matched filter; preamble pulse signal; time of arrival; accuracy

OCIS codes 070.2025; 070.4550; 100.2960; 100.3008; 100.4550

1 引言

前导脉冲信号到达时间(TOA)估计精确度是实现准确定位的基础和前提。沈建锋等^[1]提出一种高精度的 TOA 估计方法,在低采样频率下,该方法的 TOA 估计精确度高、运算量小,但是没有涉及信号在不同信噪比(SNR)和高采样频率下的 TOA 精确度问题。孙超等^[2]提出一种基于自相关算法的 TOA 估计方法,设置双门限对阈值选取进行改进,

仿真结果表明,该方法比较适用于中、高信噪比情况,在过低信噪比下仍有较大的测时误差。谭钊章等^[3]提出一种基于相关累积的雷达信号 TOA 估计算法,该算法只针对提高低信噪比下脉冲信号 TOA 的精确度,没有说明能否提高较高信噪比时 TOA 的估计精确度。Chung 等^[4]直接将匹配滤波器输出的峰值点确定为直径分量的位置点,但是该方法需要较高的采样速率,运算量较大,复杂度较高,不易实现。Galati 等^[5]指出用前 8 μs 的前导脉冲信号

收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-02-15; 录用日期: 2020-03-17

基金项目: 科技部重点研发计划(2018YFC0809500)

* E-mail: fygong@cauc.edu.cn

直接进行匹配滤波可计算脉冲 TOA,但是只要参考信号中有足够大的能量信号,匹配结果就会有相应峰值出现,这会造成较大的测时误差。Chung 等^[4-5]所讨论的匹配滤波算法都是基于相干理论的,需要大量的采样数据、较高的采样频率,接收装备需要配置与发射脉冲精确匹配的传输函数,但是由于发射脉冲在空中传播时易受噪声、天线等因素影响,产生较为精确的匹配传输函数波形比较困难。Galati 等^[6-9]进一步提出一种差分匹配滤波器 TOA 估计方法,该方法的门限为固定的零点,避免门限引起的测量误差,但该方法仅讨论第一个脉冲在高信噪比时的 TOA 估计精确度问题。

2 问题提出

在天津机场终端区设置一个 ADS-B 接收机,在实时接收的真实数据中提取单脉冲信号,其通过差分匹配滤波器后的方均根误差变化趋势如图 1 所示,实时单脉冲信号通过差分匹配滤波器 TOA 估计的方均根误差(RMSE)变化剧烈、不稳定,会造成较大的定位误差。

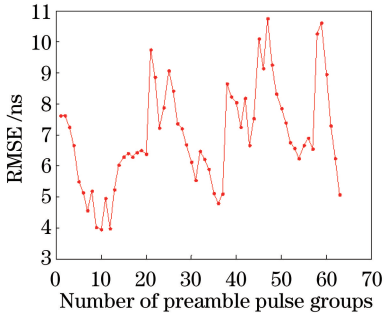


图 1 实时单脉冲信号 TOA RMSE 变化趋势

Fig. 1 TOA RMSE variation trend of real-time monopulse signal

针对上述问题,以 S 模式信号为例,提出一种双脉冲和四脉冲信号差分匹配滤波器 TOA 估计算法。与单脉冲信号 TOA 估计相比,仿真结果验证了四脉冲信号差分匹配滤波器 TOA 估计的精确度与稳定性^[10-12]。

3 基本原理

S 模式信号有固定的格式,数学模型^[13]为

$$b(t) = \sum_{i=1}^{128/240} b(i)p(t-iT), \quad (1)$$

式中: $p(t)$ 为矩形脉冲;周期 $T=0.5 \mu\text{s}$; i 为前导脉冲的重复次数。

3.1 差分匹配滤波器

假设 n 时刻输入脉冲信号为 $s(n)$,表达式为

$$s(n) = \sum_{m=0}^{N-1} c_m \delta(n-m), \quad (2)$$

式中: c_m 为信号幅值; $\delta(n)$ 为冲激响应序列; m 为脉冲时刻; N 为 S 模式信号长度。

经推导得 n 时刻的差分匹配滤波器传输函数 $h(n)$ 为

$$h(n) = \sum_{m=0}^N d_m \delta(N-n-m), \quad (3)$$

式中: d_m 为差分匹配滤波器输出信号幅值。 n 时刻的差分匹配滤波器输出函数 $s_o(n)$ 为

$$s_o(n) = s(n) * h(n) = \sum_{l=0}^{N-1} s(l)h(n-l), \quad (4)$$

式中: l 为脉冲信号时间; $s(n)$ 为 n 时刻的前导脉冲信号; $s(l)$ 为 l 时刻的前导脉冲信号。

差分匹配滤波器传输函数是对匹配滤波器传输函数进行差分运算得到的,输出函数是对输入脉冲信号与差分匹配滤波器传输函数进行卷积得到的。

3.2 到达时间

假设唯一的噪声是零均值高斯白噪声,样本具有统计独立性。

经推导得差分匹配滤波器的到达时间 T_0 ^[6] 为

$$\sum_{j=0}^N v_j h(T_j - T_0) = 0, \quad (5)$$

式中: $h(t)$ 为传输函数; T_j 为第 j 时刻对应的 TOA; v_j 为在时刻 T_j 对信号的采样值,不为 0,则

$$T_j - T_0 = 0. \quad (6)$$

在无干扰条件下,滤波器接收信号的脉冲响应为理想信号的导数,此时脉冲信号通过差分匹配滤波器的 TOA 是差分匹配滤波器输出函数的过零点^[6]。

3.3 到达时间精确度

假设无噪脉冲信号差分匹配滤波器的 TOA 标记在第 N_0 个采样点,含噪声脉冲信号差分匹配滤波器的 TOA 标记在第 N_i 位采样点,则 TOA 标记的 RMSE^[14] 表示为

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{q=1}^{N_i} \sigma_{T_q}^2}, \quad (7)$$

式中:第 q 次的 TOA 测量误差 $\sigma_{T_q} = |N_q - N_0| \times T_s$, T_s 为采样间隔。

3.4 脉冲信号过渡关系

仿真条件如表 1 所示, f_s 为脉冲信号采样频率, t_1 为上升沿上升时间, t_2 为下降沿下降时间,符合仿真条件的脉冲信号通过各自对应的差分匹配滤

波器后的输出 RMSE 如图 2 所示。

如图 2 所示,不含噪声、过渡时间不等的前导脉冲信号满足等式关系 $t_2 = t_1 + \frac{1}{f_s}$ 时,差分匹配滤波器的输出 RMSE 为 0。由于脉冲信号的上升沿上升时间为 $0.05 \sim 0.10 \mu\text{s}$,下降沿下降时间为 $0.05 \sim 0.2 \mu\text{s}$,不是所有满足上述时间等式关系的前导脉冲均适用,比如 b1, b2, c1, c2 虽然满足时间等式关系,但是这几种情况均不满足上升沿上升时间范围,在仿真时就不能继续使用。

表 1 脉冲信号的仿真条件

Table 1 Simulation conditions of pulse signal

RMSE group	f_s/MHz	t_1	$t_2/\mu\text{s}$
a1	80	uncertain	0.10
b1	80	uncertain	0.20
c1	80	uncertain	0.05
a2	100	uncertain	0.10
b2	100	uncertain	0.20
c2	100	uncertain	0.05

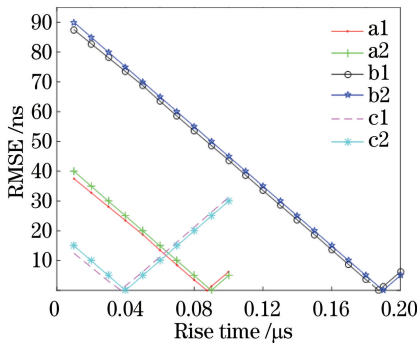


图 2 具有过渡关系的前导脉冲差分匹配滤波器的输出 RMSE

Fig. 2 Output RMSE of preamble pulse differential matched filtering with transition relationship

4 算法性能分析与讨论

4.1 算法性能分析

将从脉冲个数、SNR、真实数据、仿真数据等几个方面测量 RMSE,分析四脉冲信号的 TOA 估计精确度与稳定性。

仿真条件:采用 SNR 为 20 dB,采样频率为 80 MHz,上升沿上升时间为 $0.1 \mu\text{s}$,下降沿下降时间为 $0.1125 \mu\text{s}$ 的前导单、双、四脉冲信号,1000 次仿真后得到脉冲信号经差分匹配滤波器后的输出 RMSE,如图 3 所示。可以看出,在相同仿真条件下,与其他两种信号相比,四脉冲信号差分匹配滤波器的输出 RMSE 最小,表明四脉冲信号差分匹配滤

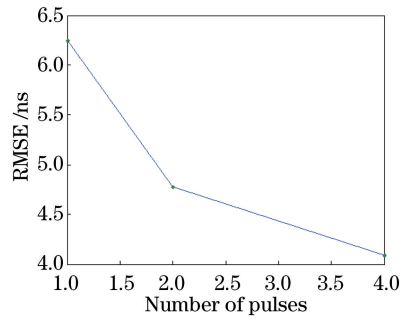


图 3 仿真条件相同的脉冲信号差分匹配滤波器的输出 RMSE

Fig. 3 Output RMSE of differential matched filtering of pulse signals at same simulation conditions

波器 TOA 估计的精确度最高。

4.2 信噪比

仿真条件:采用不同 SNR,采样频率为 80 MHz,上升沿上升时间为 $0.1 \mu\text{s}$,下降沿下降时间为 $0.1125 \mu\text{s}$ 的前导单、双、四脉冲信号,1000 次仿真后得到不同 SNR 下单脉冲、双脉冲、四脉冲信号经差分匹配滤波器后的输出 RMSE,结果如表 2 所示。从纵向看,脉冲个数逐渐增多,信号的能量逐渐增强,差分匹配滤波器的输出 RMSE 逐渐减小,即四脉冲信号的输出 RMSE 最小,TOA 的标记精确度最高;从横向看,输入 SNR 越高,差分匹配滤波器的输出信号的 RMSE 越小,TOA 的标记精确度就越高。

表 2 不同 SNR 下的差分匹配滤波器的输出 RMSE

Table 2 Output RMSE of differential matched filter under different SNR

Type	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
Single-pulse	25.5030	14.0348	11.3069	9.2460	6.0982
Two-pulse	21.2952	12.2209	11.3166	9.1777	5.0577
Four-pulse	19.2590	11.9817	10.8060	8.6272	3.8947

4.3 真实数据验证

在天津机场终端区设置一个 ADS-B 接收机,实时接收的真实数据如图 4(a)所示。接收机接收到的信号中有 500 万个采样点,包含 63 组完整的 S 模式信号,即每隔 8 万个采样点会出现 1 个完整的前导脉冲信号,如图 4(b)所示。接收机采样频率为 80 MHz,接收到的信号的 SNR 约 20.59 dB。d1、d2、d3 分别为实采数据单、双、四脉冲信号经各自的差分匹配滤波器输出的到达时间 RMSE 分布情况。为对比方便,将实采数据中单、双、四脉冲信号通过各自的差分匹配滤波器到达时间 RMSE 放到同一张图中,如图 5(a)所示。63 组实时数据中单、双、四

脉冲信号经差分匹配滤波器的输出 RMSE 如图 5 (b)所示。提取出的 63 组脉冲信号 SNR 的最值、均

值及最大值位置,脉冲信号 RMSE 的最值、均值及最大值位置如表 3 所示。

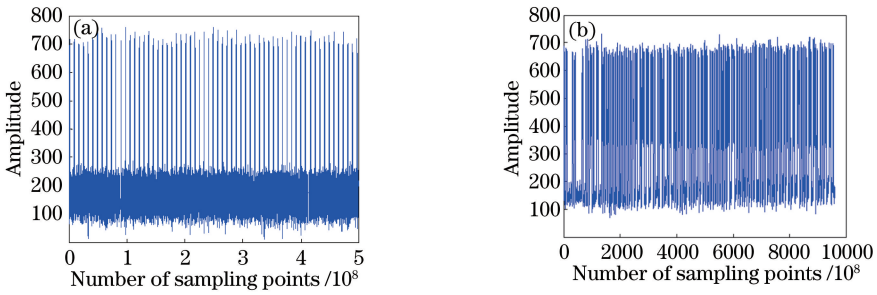


图 4 接收的实时数据。(a)接收机输出实时波形;(b)截取的完整 S 模式信号

Fig. 4 Received real-time data. (a) Real-time waveform from receiver; (b) intercepted complete S-mode signal

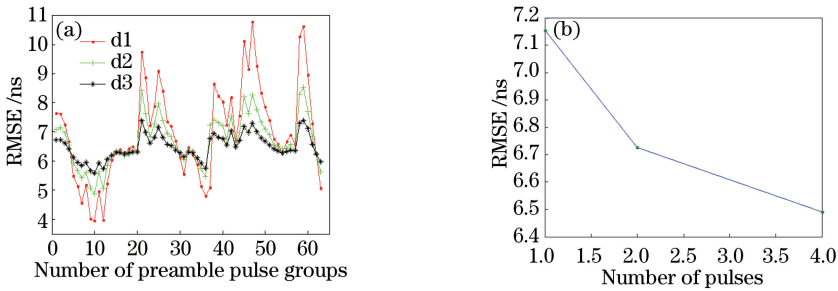


图 5 单、双、四脉冲信号的 RMSE。(a) TOA 的 RMSE 变化趋势;(b) 前导脉冲信号的 RMSE 变化

Fig. 5 RMSE of single-, two-, and four-pulse signals. (a) RMSE change trends of TOA; (b) change of RMSE of preamble pulse signals

表 3 脉冲信号的最值分布

Table 3 Minimum and maximum distribution of pulse signal

Parameter	Max	Min	Mean of received data	Max position	Min position
SNR /dB	21.6802	20.3251	20.9593	10	59
RMSE of single-pulse /ns	10.7615	3.9435	7.1552	47	10
RMSE of two-pulse /ns	8.5324	4.8615	6.7270	59	10
RMSE of four-pulse /ns	7.3987	5.5624	6.4900	59	10

如图 5(a)所示,在 63 组实时数据中,单脉冲信号差分匹配滤波器 TOA 估计所对应的 RMSE 变化起伏最大、最不稳定。由于脉冲信号能量的积累,与其他两种脉冲信号相比,四脉冲信号抵抗噪声的能力变强。相较其他两种脉冲信号的变化趋势,四脉冲信号差分匹配滤波器 TOA 估计 RMSE 分布最稳定,验证了四脉冲信号差分匹配滤波器 TOA 估计 RMSE 分布的稳定性。

如图 5(b)所示,在 63 组实时数据中,与其他两种脉冲信号相比,四脉冲信号差分匹配滤波器的输出 RMSE 最小,验证了四脉冲信号差分匹配滤波器 TOA 估计的精确度。

如表 3 所示,单脉冲信号 RMSE 最大值与最小值之间的差值为 6.818 ns,四脉冲信号 RMSE

最大值与最小值之间的差值为 1.8363 ns,验证了四脉冲信号差分匹配滤波器 RMSE 的稳定性。SNR 最大值位置与脉冲信号 RMSE 最小值位置一样,SNR 最小值位置与 RMSE 最大值位置基本相同,63 组前导脉冲信号中,单、双、四脉冲信号的 RMSE 逐渐减小,表明四脉冲信号 TOA 估计精确度最高。

4.4 仿真数据验证

从接收机接收信号中提取 63 组完整的 S 模式信号,计算其 SNR,均值为 20.59 dB,用与提取信号 SNR 一样的仿真信号、低 SNR 的仿真信号、高 SNR 的仿真信号验证四脉冲信号差分匹配滤波器 RMSE 的精确度与稳定性。

仿真条件:采用 63 组与真实数据 SNR 相同的

单、双、四脉冲信号,比真实数据 SNR 高 20 dB 的单、双、四脉冲信号,比真实数据 SNR 低 20 dB 的单、双、四脉冲信号,它们分别通过对应的差分匹配滤波器,观察输出 RMSE 的变化趋势,如图 6 所示。aa、bb、cc 分别代表低 SNR 下,单、双、四脉冲信号差分匹配滤波器捕获 TOA 时对应的 RMSE; dd、ee、ff 分别代表同 SNR 下,单、双、四脉冲信号差分匹配滤波器捕获 TOA 时对应的 RMSE; gg、hh、jj 分别代表高 SNR 下,单、双、四脉冲信号差分匹配滤波器捕获 TOA 时对应的 RMSE。

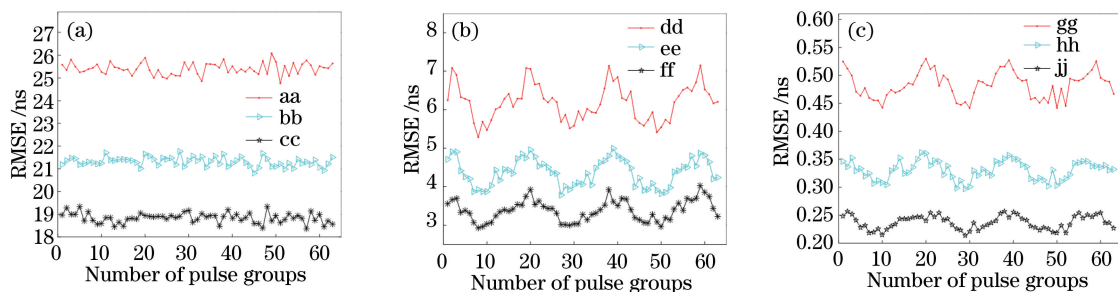


图 6 不同 SNR 下前导脉冲信号 RMSE 变化。(a)在低 SNR 下;(b)在同 SNR 下;(c)在高 SNR 下

Fig. 6 RMSE change of preamble pulse signals at different SNR. (a) Under lower SNR; (b) under same SNR; (c) under higher SNR

5 结 论

研究 S 模式前导脉冲信号差分匹配滤波器到达时间估计精确度问题,以提升定位性能。在单脉冲差分匹配滤波器到达时间估计的基础上,提出双脉冲、四脉冲信号差分匹配滤波器到达时间估计算法。该算法从脉冲个数和信噪比角度对脉冲信号差分匹配滤波器的输出方均根误差进行对比,仿真结果验证了所提算法的有效性。在输入信噪比为 20 dB 时,四脉冲信号差分匹配滤波器的到达时间估计精确度达 3.8947 ns,远低于国际民航组织规定的时间误差精确度最大值 25 ns^[15-16]。用天津机场终端区 ADS-B 接收机接收的实际数据验证了所提算法的稳定性,用不同信噪比段的前导脉冲信号验证了所提算法的精确度与稳定性。但是脉冲信号在低信噪比 0 dB 时,所提算法的输出方均根误差仍然很大,还需继续改进。

参 考 文 献

[1] Shen J F, Wang Z X. A TOA estimation method with high resolution [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2003, 25(11): 1463-1468.
沈建锋, 王宗欣. 一种高精度的 TOA 估计方法[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(11): 1463-1468.

如图 6 所示,仿真数据仅受高斯白噪声的影响,与真实数据差分匹配滤波器 RMSE 存在偏差,但是 RMSE 的变化趋势大体相同。三种情况下的四脉冲信号差分匹配滤波器 RMSE 最小,变化趋势最为平缓,表明四脉冲信号差分匹配滤波器 RMSE 的精确度与稳定性均高于其他两种信号;在低 SNR 情况下,四脉冲信号差分匹配滤波器的精确度明显高于其他两种信号,由于单、双、四脉冲信号 RMSE 相差较大,稳定度在图中显示不太明显,但四脉冲信号稳定度变化仍是最为平缓、最稳定的。

[2] Sun C, Wang S L, Zhu J. Research of TOA estimation based on auto-correlation algorithm [J]. Microprocessors, 2014, 35(4): 39-43.
孙超, 王世练, 朱江. 基于自相关算法的 TOA 估计方法研究[J]. 微处理机, 2014, 35(4): 39-43.
[3] Tan C Z, Li H W, Fan C Z. Estimation algorithm of radar signal arrival time based on correlated accumulation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2018, 38(1): 161-164, 169.
谭钊章, 李宏伟, 樊昌周. 基于相关累积的雷达信号到达时间估计算法[J]. 火箭与制导学报, 2018, 38(1): 161-164, 169.
[4] Chung W C, HaD. An accurate ultra wideband (UWB) ranging for precision asset location [C] // IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, November 16-19, 2003, Reston, VA, USA. New York: IEEE, 2003: 389-393.
[5] Galati G, Gasbarra M, Piracci E G. Decoding techniques for SSR mode S signals in high traffic environment [C] // European Radar Conference, October 3-4, 2005, Paris, France. New York: IEEE, 2005: 383-386.
[6] Galati G, Leonardi M, de Marco P, et al. New time of arrival estimation method for multilateration target location [C] // Joint International Symposium on Sensors and Systems for Airport Surveillance, June

- 20-21, 2005, Paris, France. [S. l. : s. n.], 2005: 116-119.
- [7] Lin W C, Liu K C, Wang C K. Differential matched filter architecture for spread spectrum communication systems [J]. Electronics Letters, 1996, 32 (17): 1539.
- [8] Petrochilos N, Galati G, Piracci E. Separation of SSR signals by array processing in multilateration systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 965-982.
- [9] Galati G, Leonardi M, Tosti M. Multilateration (local and wide area) as a distributed sensor system: lower bounds of accuracy [C] // 2008 European Radar Conference, October 30-31, 2008, Amsterdam, Netherlands. New York: IEEE, 2008: 196-199.
- [10] Li Y, Qi J, Zhang Y, et al. Selection and design of filters for laser altimeters [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(4): 29-33.
李洋, 戚俊, 张毅, 等. 激光测高系统中匹配滤波器的设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(4): 29-33.
- [11] Zhang L Y. An efficient algorithm for acquisition based on the differential digital matched filter [J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27 (8): 147-150.
张立银. 一种基于差分匹配滤波的高效捕获算法 [J]. 电子科技, 2014, 27(8): 147-150.
- [12] Yang C C, Chen J H, Liu D L, et al. Indoor joint localization algorithm based on time and angle of arrival [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 222802.
杨超超, 陈建辉, 刘德亮, 等. 基于到达时间和到达角度的室内联合定位算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 222802.
- [13] Wang H, Jin E W, Liu C Z, et al. Accurate estimation of TOA and calibration of synchronization error for multilateration [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(4): 835-839.
王洪, 金尔文, 刘昌忠, 等. 多点定位 TOA 精确估计及同步误差校正算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4): 835-839.
- [14] Xu J, Li Y, Ji J H. Statistics essentials [M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 80-180.
徐江, 李艳, 纪晶华. 统计学基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 80-180.
- [15] Eurocae. Minimum operational performance specification for mode S multilateration system for use in advanced surface movement guidance and control systems (A-SMCGS): ED-117 [S]. Lucerne: Eurocae, 2003: 36-46.
- [16] Galati G, Leonardi M, Magaro P, et al. Wide area surveillance using SSR mode S multilateration: advantages and limitations [C] // European Radar Conference, October 3-4, 2005, Paris, France. New York: IEEE, 2005: 225-229.