

文章编号: 2095-4980(2021)03-0386-05

雷达采集存储设备中回波信号的 TOA 检测方法

戴宗武¹, 张少甫¹, 龚志红², 苏雅¹, 史常丽¹

(1.航天恒星科技有限公司, 北京 100080; 2.空装驻北京地区第七军事代表室, 北京 100086)

摘要: 雷达数据采集存储设备是雷达系统中的重要设备。工程实现中, 为了线下实测回波信号的到达时间(TOA), 针对雷达采集存储设备中的实测回波信号进行了分析, 提出了基于自适应阈值双门限的脉冲重复间隔(PRI)的 TOA 检测, 在收发分时系统中的任意回波数据段中实现 PRI 的 TOA 检测, 检测速度为 11 ms 左右; 提出了基于滑动窗法的合成孔径雷达(SAR)目标回波的 TOA 检测, 有效检测出雷达系统中 SAR 目标回波的 TOA, 并进行了仿真验证。

关键词: 雷达数据采集存储设备; 到达时间; 自适应阈值双门限法; 滑动窗法; 合成孔径雷达
中图分类号: TN957.51 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2019296

TOA detection method of echo signal in radar acquisition and storage equipment

DAI Zongwu¹, ZHANG Shaofu¹, GONG Zhihong², SU Ya¹, SHI Changli¹

(1.Space Star Technology Co., LTD, Beijing 100080, China;

2.The Seventh Military Representative Section of Air Force Equipment in Beijing, Beijing 100086, China)

Abstract: Radar data acquisition and storage equipment is an important equipment in radar system. It provides an effective method for off-line processing of Time of Arrival(TOA) of measured echo signal in engineering implementation. In this paper, the actual echo signal in radar acquisition and storage equipment is analyzed, and the TOA of Pulse Repetition Interval(PRI) detection method based on adaptive double-threshold is proposed, which can realize TOA detection of PRI in any echo data segment of time-sharing systems with a detection speed about 11ms. The TOA detection of Synthetic Aperture Radar(SAR) target echo based on sliding window method is proposed. The TOA of SAR target echo is effectively detected and verified by simulation.

Keywords: radar data acquisition and storage equipment; Time of Arrival; adaptive double-threshold method; sliding window; Synthetic Aperture Radar

雷达采集存储设备是采集数据、实时存储和数据重放的重要设备。现代雷达信号处理中, 由于雷达处理算法复杂度高^[1-2], 无法进行实时处理, 因此有必要通过数据采集存储设备采集、存储实时数据, 进行线下处理。此外, 实时录取的数据是研究雷达系统故障、目标回波特性、杂波和干扰特性的重要的核心和依据。到达时间(TOA)估计最早用于常规雷达的测距中, 通过接收信号与本地模板信号进行匹配滤波得到 TOA 估计, 主要为信号的时域估计。刘少成提出滑动 N 点的自相关算法测量信号的 TOA^[3-4], 利用噪声和信号统计特性的不同积累信号抑制噪声, 此算法的实时性好; 基于门限能量检测的非相干 TOA 估计算法, 需要与接收信号进行非相干处理运算^[5-8]; James 提出时域累加算法^[9], 此算法可实时检测信号, 但不适合低信噪比; 还可通过将接收信号做自卷积运算的方法估计信号的到达时间^[10]; 王芳等^[11]通过单点滑动的相关检测方法在硬件中有效实现了 TOA 检测, 适应范围广。此外, 基于信号频域的超分辨力的 TOA 算法也有一些研究^[12-15], Chan 等提出一种基于分段快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的频域方法^[16], 此方法可用于低信噪比和信号参数未知的情况, 但该算法需要进行分段处理。

上述 TOA 估计算法复杂, 针对的是目标信号 TOA, 现有文献缺乏针对数据采集存储设备的回波数据中的

收稿日期: 2020-05-15; 修回日期: 2020-07-07

作者简介: 戴宗武(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达导引头系统设计及雷达信号处理。email: zongwudai@163.com

PRI TOA 检测方法及 SAR 目标位置检测方法。本文针对雷达数据采集存储设备中的实测回波信号,设计实现了回波信号的 TOA 检测方法。针对单脉冲雷达收发分时体制下的内场实测回波信号,提出了基于自适应阈值双门限的 PRI 的 TOA 检测,快速有效地在任意回波数据段得到 PRI 的 TOA,检测速度为 11 ms 左右,为后续处理提供完整的 PRI 数据;针对 SAR 雷达体制下的外场实测回波信号,提出了基于滑窗法的 SAR 目标回波的 TOA 检测,有效提取出目标的 TOA,为 SAR 目标信号区域的线下处理提供有效的预处理方法。

1 基于自适应阈值双门限的 PRI 的 TOA 检测

雷达为了避免发射和接收之间的串扰,通常设计为收发分时系统,发射信号时不接收回波信号,因此在时域处理中,雷达数据采集存储设备采集到的一个 PRI 的数据如式(1)所示。假设接收到的线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)雷达信号的复数形式的数学模型如式(2)所示。

$$x_n = \begin{cases} p(n), & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ w(n), & n = N, N+1, \dots, M \\ s(n) + w(n), & n = M+1, M+2, \dots, L \\ w(n), & n = L+1, L+2, \dots, L+P \end{cases} \quad (1)$$

$$s(n) = A \exp\{j[2\pi f_c n \Delta t + \phi(n) + \theta_0]\} \quad (2)$$

式中: x_n 为一个 PRI 的回波数据; n 为离散时间序列; $p(n)$ 为在雷达发射时间段采集的内部噪声; $w(n)$ 为回波信号中的外部噪声和干扰信号; $s(n)$ 为回波信号中目标信号; A 为雷达信号幅度; f_c 为载频; Δt 为采样间隔; $\phi(n)$ 为调制相位; θ_0 为初始相位。

在单脉冲雷达体制下,雷达数据采集存储设备在雷达发射信号的时间段内,采集存储的是内部噪声,并随着每一个 PRI 形成周期脉冲。在时域上,雷达发射时间期间的内部噪声的幅度远低于接收回波信号的幅度。在这种情况下,将整个 PRI 的数据期望值作为阈值,即第一个门限,如式(3)所示:

$$y(n) = \begin{cases} 1, & x_n > E(x_n) \\ 0, & x_n \leq E(x_n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $y(n)$ 为第一个门限; $E(\cdot)$ 表示求期望。对于雷达采集存储设备,每一个 PRI 的发射信号时间段内,采集信号长度 L_0 是已知的,因此, $y(n)$ 中连续等于 0 的长度为 L_0 。但由于干扰和噪声的影响,在脉冲的开始和结束边沿都有一定的过渡带,使 $y(n)$ 中连续等于 0 的长度在 L_0 的范围抖动。在可容许的误差范围内,判断 $y(n)$ 中连续等于 1 的长度为 $L_1 = \eta L_0$,其中 η 根据可容范围定。为判断 $y(n)$ 中连续为 0 的数据,采用相关算法进行计算,如式(4)所示:

$$z(n) = \sum_{l=0}^{L_1-1} y(n+l)y_1(n+l+1) = \begin{cases} 0, & n = n_0 \\ > 0, & n \neq n_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $y_1(n) = 1(1 \leq n \leq L_1)$ 。通过判断 $z(n)$ 的值, 0 作为阈值,即第二个门限,此时得到 n_0 值,则当前 PRI 的 TOA 为 $n_0 - T_n$, T_n 为发射时间段。通过上述方法,有效实现了对回波数据 PRI 的 TOA 检测。

任意取数据采集存储设备的内场实验数据组 1,由于数据采集存储设备是连续录取数据的,通常会出现如图 1 所示的情况:第一个大于阈值的数据不是 PRI 的起始位置,是上一个 PRI 的一小部分数据。采用上述自适应阈值双门限的 PRI 的 TOA 检测方法,可得到 PRI 的 TOA 的准确位置。

将采集的数据与长度为 L_1 的全“1”信号进行相关运算,出现零点的位置,即得出当前 PRI 的 TOA 为 $n_0 - T_n$,见图 2。图 3 中根据 PRI 的到达时间读取 64 个 PRI 的数据,从图中看出,发射时间段,数据采集存储设备采集的是内部噪声,信号能量小,每一个 PRI 的发射时间段的长度一致。试验结果表明,该算法准确地检测出连续的

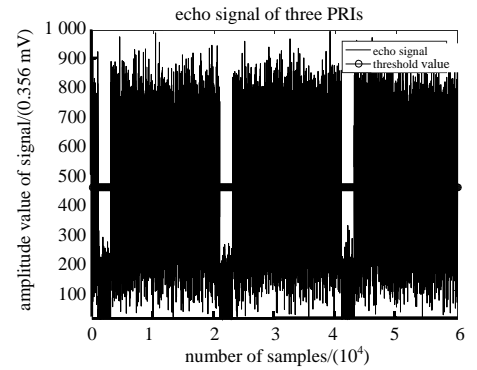


Fig.1 Data set 1 of three PRIs in the field experiment
图 1 内场实验 3 个 PRI 的数据组 1

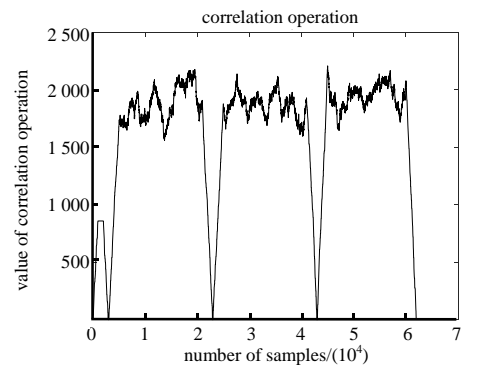


Fig.2 Correlation processing of data set 1
图 2 数据组 1 的相关处理

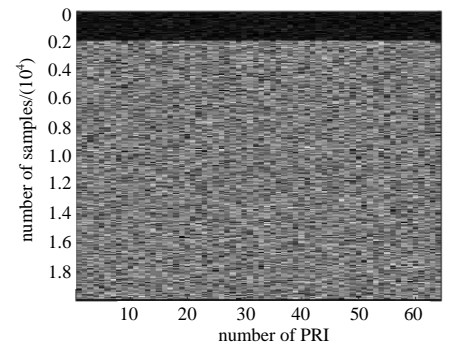


Fig.3 TOA detection of PRI in data set 1
图 3 数据组 1 的 PRI 的 TOA 检测

PRI 的 TOA。任意取数据采集存储设备的内场实验数据组 2 和数据组 3, 采用上述自适应阈值双门限的 PRI 的 TOA 检测方法, 得到 PRI 的 TOA 的准确位置, 见图 4~图 9。

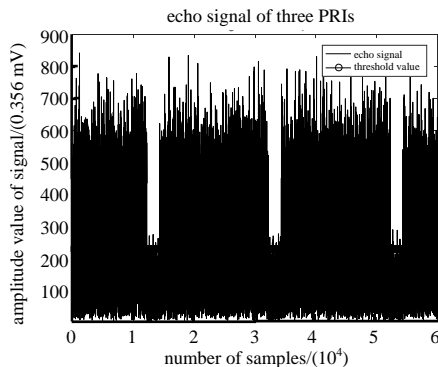


Fig.4 Data set 2 of three PRIs in the field experiment
图 4 内场实验 3 个 PRI 的数据组 2

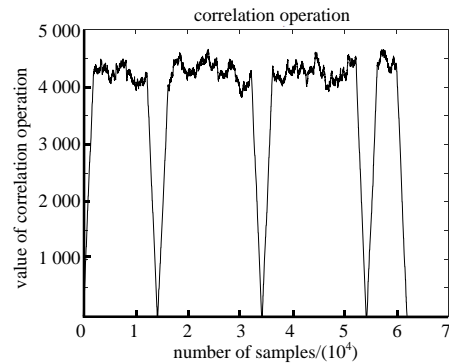


Fig.5 Correlation processing of data set 2
图 5 数据组 2 的相关处理

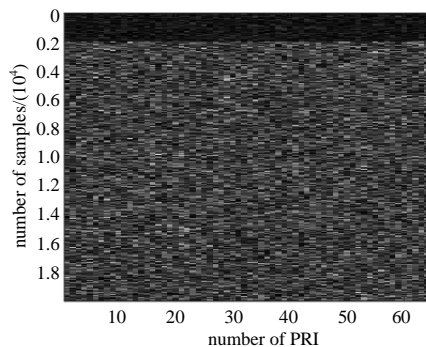


Fig.6 TOA detection of PRIs in data set 2
图 6 数据组 2 的 PRI 的 TOA 检测

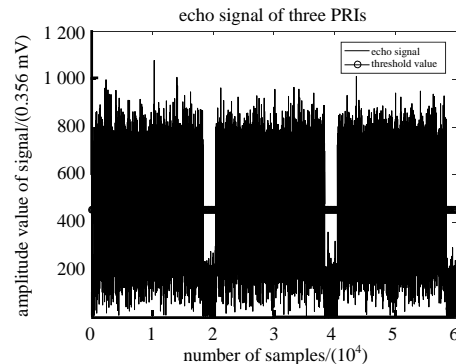


Fig.7 Data set 3 of three PRIs in the field experiment
图 7 内场实验 3 个 PRI 的数据组 3

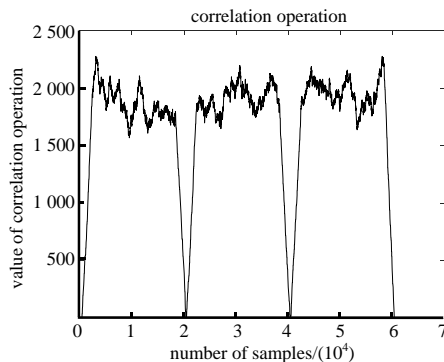


Fig.8 Correlation processing of data set 3
图 8 数据组 3 的相关处理

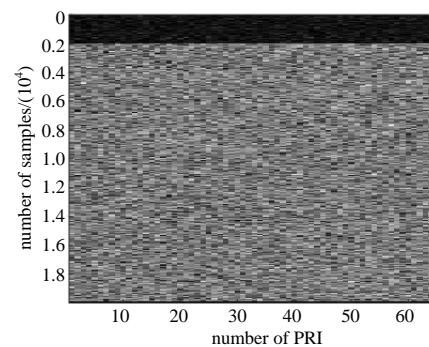


Fig.9 TOA detection of PRI in data set 3
图 9 数据组 3 的 PRI 的 TOA 检测

数据组 1、数据组 2 和数据组 3 的 PRI 的周期不同, 采用上述自适应阈值双门限的 PRI 的 TOA 检测方法, 得到了 PRI 的 TOA 的准确位置。数据组 1、数据组 2 和数据组 3 的 PRI 的 TOA 检测时间分别为 0.012 s, 0.014 s 和 0.010 s, 3 个数据组检测 TOA 的时间不一致, 主要是因为 3 组数据零点的位置不同, 数据组 3 的零点位置小于数据组 1 和数据组 2 的数据量。此外, 在内场的数据中任意取 100 次的数段, 对 TOA 的检测时间进行了平均运算, 时间在 11 ms 左右, 因此, 该检测的实时性好。

2 窗法的目标回波的 TOA 检测

数据采集存储设备采集 SAR 雷达体制下数据, 若在收发分时系统中, 则采用第一种方法检测出 PRI 的 TOA, 再利用已知的雷达波束照射距离, 推算出 SAR 的目标回波的 TOA; 若在非收发分时系统, 如回波模拟器 SAR 数据实验测试, 或收发分时系统中存在强发射射频泄漏, 发射和接收没有能量大小界限区分时, 提出滑窗法进行

目标回波的 TOA 检测。

任意截取数据采集存储设备采集的数据一个相干处理间隔 (Coherent Processing Interval, CPI) 的数据量, 开始滑动搜索。窗宽为 w_0 , 每次重叠窗的长度为 w_L 。 w_0 为采样点数, w_L 为每次重叠采样点的长度。将每组窗内的数据进行后续的处理分析, 得到 SAR 图像, 从而确定在每一个 PRI 中目标回波所在的位置, 见图 10。

仿真数据为数据采集存储设备中的某次挂飞试验中的实测数据。由于数据中存在射频发射泄露和强的窄带压制干扰, 无法采用第一种方式进行检测。因此采用滑窗方法解决回波信号无法定位的问题。图 11 中通过截取整个 CPI 中的不同距离位置处的数据, 进行 SAR 成像处理。从刚开始找不到目标回波位置, 到目标位置逐渐清晰的过程中, 找出目标回波所在的整个范围。从图 11(b)中得到目标回波的位置在 $r=76\ 002\ \text{m}$ 处第一次出现, 因此目标回波的 TOA 在每一个 PRI 的这个位置处。其余的数据根据 PRI 周期性, 检测出目标回波。

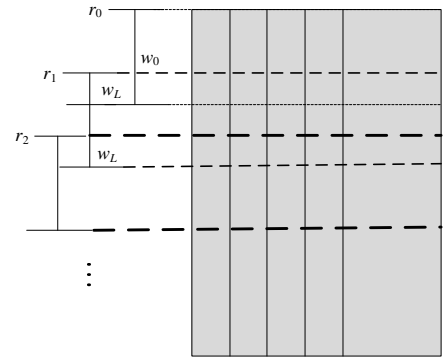


Fig.10 Data sliding window processing of CPI
图 10 一个 CPI 的数据滑窗处理

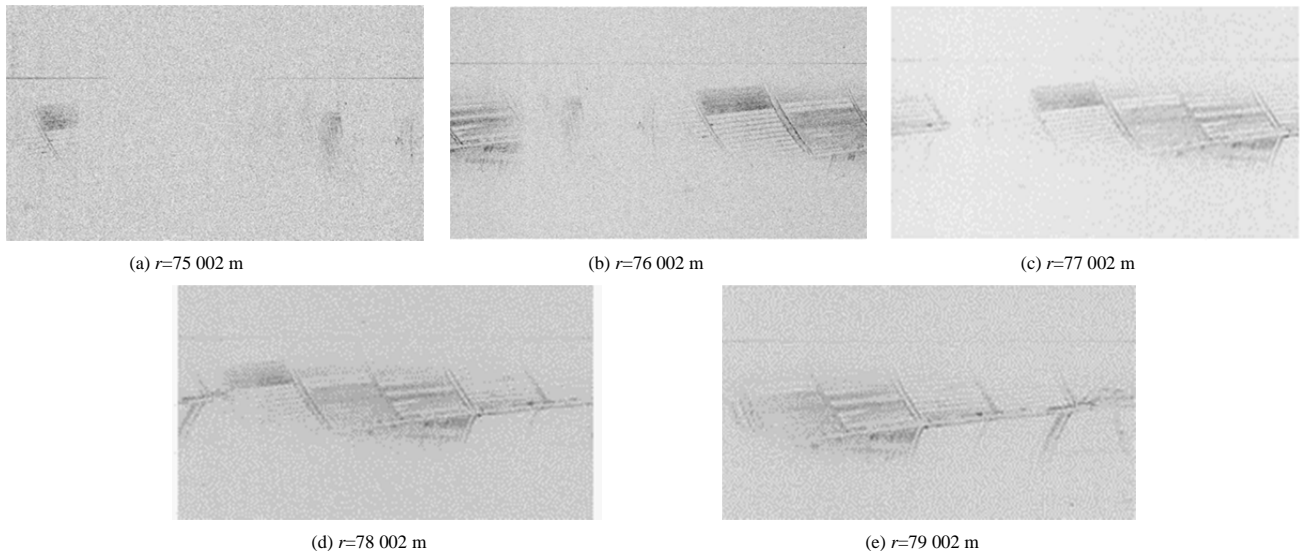


Fig.11 Sliding window processing method
图 11 滑窗处理的方法

3 结论

针对单脉冲体制下的收发分时雷达系统, 提出了基于自适应阈值双门限的 PRI 的 TOA 检测, 并通过内场实测回波数据进行仿真验证分析。结果表明, 该方法快速有效地在任意回波数据段得到 PRI 的 TOA; 针对 SAR 体制下的非收发分时雷达系统, 或收发分时系统中存在强发射射频泄露时, 提出了基于滑窗法的 SAR 目标回波的 TOA 检测, 并通过某次挂飞数据进行仿真验证分析。结果表明, 该方法有效地确定出目标回波的起始位置及波束照射的整个 SAR 成像范围。本文为雷达数据采集存储设备数据的 TOA 的预处理检测, 提供了有效解决方法。

参考文献:

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. (BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.)
- [2] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. (DING Lufei, GENG Fulu. Principles of radar[M]. Xi'an, China: Xidian University Press, 2002.)
- [3] 刘少成. 电子侦察信号实时检测算法及其应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011. (LIU Shaocheng. Real time detection algorithm of electronic reconnaissance signal and its application[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2011.)
- [4] LIU S, JIN B, YANG H, et al. A real time algorithm for signal detection based on autocorrelation at low SNR[C]// IEEE International Conference on Signal Processing. Beijing: IEEE, 2010: 2092-2095.

- [5] LIU Wenyan,HUANG Xiaotao,JIN Tian,et al. Entropy based TOA estimation in IR UWB ranging with energy detection receiver under dense multipath environment[C]// 2013 IEEE International Conference on Ultra-Wideband(ICUWB). Sydney, NSW,Australia:IEEE, 2013:31-36.
- [6] DING Hong,LIU Wenyan,HUANG Xiaotao,et al. TOA estimation in IR UWB ranging using rank statistics with energy detection receiver under harsh conditions[C]// 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). Shanghai,China:IEEE, 2013:1255-1260.
- [7] 姜向远,张焕水,王伟,等. IR-UWB 能量检测接收机中基于门限的 TOA 估计[J]. 电子与信息学报, 2011,33(6):1361-1366. (JIANG Xiangyuan,ZHANG Huanshui,WANG Wei,et al. Threshold-based TOA estimation in IR-UWB energy detection receiver[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011,33(6):1361-1366.)
- [8] 吴绍华,张钦宇,张乃通. 新颖的基于门限比较的脉冲超宽带 TOA 估计算法[J]. 通信学报, 2008,29(7):7-13. (WU Shaohua,ZHANG Qinyu,ZHANG Naitong. A novel TOA estimation algorithm based on threshold comparison[J]. Journal of Communications, 2008,29(7):7-13.)
- [9] JAMES T B. Digital techniques for wideband receivers[M]. Boston,USA:Artech House, Inc, 1995.
- [10] CHAN Y T,LEE B H,INKOL R,et al. Estimation of pulse parameters by convolution[C]// 2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Ottawa,ON,Canada:IEEE, 2006:17-20.
- [11] 王芳,王旭东,潘明海. 一种实时雷达脉冲信号检测算法及其性能分析[J]. 现代电子技术, 2012(7):5-8. (WANG Fang,WANG Xudong,PAN Minghai. A real-time radar pulse signal detection method and its performance analysis[J]. Modern Electronics Technique, 2012(7):5-8.)
- [12] 李晶,裴亮,曹茂水,等. 一种用于多径环境下的超分辨率 TOA 定位算法[J]. 电波科学学报, 2006,21(5):771-776. (LI Jing,PEI Liang,CAO Maoshui,et al. A super-resolution TOA location algorithm for multipath environment[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006,21(5):771-776.)
- [13] LI Y C,CHONG J W. High-resolution range estimation technique using shift invariant TOA estimation algorithm for indoor localization of chip spread spectrum system[C]// 2012 3rd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content(IC-NIDC). Beijing:IEEE, 2012:567-572.
- [14] PAHLAVAN K,LI X R,MAKELA J P. Indoor geolocation science and technology[J]. IEEE Communications Magazine, 2002,40(2):112-118.
- [15] 刘超,王英民. 子空间算法在 OFDM 信道时延估计中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(4):534-537. (LIU Chao,WANG Yingmin. Application of subspace algorithm to time delay estimation in OFDM channels[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):534-537.)
- [16] CHAN Y T,LEE B H,INKOL R,et al. Detection and arrival time estimation of a pulsed sinusoid[C]// 2005 IEEE Pacific Rim Conference on Communications,Computers and Signal Processing. Victoria,BC,Canada:IEEE, 2005:37-40.