

文章编号: 2095-4980(2015)05-0729-07

## 基于目标加速度的 DTTB 信号模糊函数副峰抑制算法

袁春姗

(昆明船舶设备研究试验中心, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 具有自主知识产权的国标地面数字电视广播(DTTB)信号以其高发射机功率、大的覆盖面积、宽的信号带宽等优点, 成为热门雷达辐射源。但由于信号帧头存在周期性重复或变化, 在进行模糊函数分析时不可避免地产生周期性副峰的问题, 这直接影响到信号的探测性能。随着研究的深入和科技的发展, 所面临的侦察的目标加速度也越来越大, 加速度已经成为不可忽视的因素, 而传统抑制副峰的算法, 没有考虑加速度的影响。因此提出一种思路, 利用目标的加速度抑制 DTTB 周期重复引起的副峰。仿真分析表明, 该算法能有效抑制 DTTB 信号距离多普勒副峰。

**关键词:** 地面数字电视广播; 加速度; 模糊函数; 副峰抑制

**中图分类号:** TN949.197

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201505.0729

## DTTB signals side peaks suppression algorithms based on target acceleration

YUAN Chunshan

(Kunming Shipborne Equipment Research and Test Center, Kunming Yunnan 650051, China)

**Abstract:** Chinese standard Digital Television Terrestrial Broadcasting(DTTB) signals have become a hot radar emitter due to their remarkable advantages such as high transmitter power, large coverage area, and wide signal bandwidth. However, in consequence of the periodic repeat of signal frame head, it inevitably generates periodic side peaks during ambiguity function analysis, which directly affects the signal detection performance. Therefore, it is essential to suppress side peaks. With the development of the technology, the acceleration of target reconnoitred increases continuously, which makes the acceleration to be an important factor and can not be ignored. Nevertheless, the influences of acceleration have not been considered in traditional side peaks suppression algorithm. In this paper, a new side peaks suppression algorithm based on target acceleration is presented to suppress side peaks caused by DTTB signals periodic repeat. The simulation results show that this method can effectively suppress DTTB signal range and Doppler peaks.

**Key words:** Digital Television Terrestrial Broadcasting; acceleration; ambiguity function; side peaks suppression

地面数字电视广播(DTTB)以其具备高发射机功率、大的覆盖面积、宽的信号带宽<sup>[1]</sup>等优点, 近年来受到雷达研究领域的广泛关注。在雷达分辨理论中, 这些优点决定了 DTTB 信号作为外照射源应用于目标探测具有良好的距离和速度分辨性能<sup>[2-3]</sup>。DTTB 信号有 2 种信号形式: 单载波模式和多载波模式。单载波 DTTB 信号存在周期性重复的帧头; 多载波 DTTB 信号的帧头有着规律性很强的循环重复的相位变化, 这种周期重复或周期变化的信号成分增加了信号的相关程度, 会导致信号在做模糊函数分析时出现周期性副峰<sup>[4-5]</sup>。因此如果直接用 DTTB 信号作为雷达信号, 抑制副峰即抑制信号的周期成分至关重要。国内外针对对付副峰抑制的文献很多<sup>[5-10]</sup>, 通常采用预处理直达波参考信号的作法<sup>[5-7]</sup>来去除信号的周期成分, 从而抑制副峰, 但没有考虑目标加速运动所带来的影响。随着研究的深入和科技的发展, 雷达信号的波长可以到分米段, 所面临的侦察的飞行器目标的加速度也越来越大, 加速度已经成为不可忽视的因素<sup>[11-12]</sup>。本文提出一种思路, 利用目标的加速度消除周期成分引起的副峰。该思路以加速目标的雷达回波信号模型和加速度模糊函数为理论工具<sup>[11-12]</sup>, 分析指出加速目标与接收天线之间存在的相对加速度, 可有效抑制周期性副峰。

## 1 加速目标的雷达回波信号模型

DTTB 信号频宽约 8 MHz, 所在频段为甚高频或特高频, 频率范围是 48.5 MHz~223 MHz 或 470 MHz~806 MHz, 所以 DTTB 信号基本属于窄带信号范畴。

为简化讨论, 以下假设发射天线与接收天线距离很近, 双基地雷达的模型可以简化为单基地雷达模型, 并且假设探测目标为理想点目标, 窄带信号的雷达回波信号表达式<sup>[11]</sup>:

$$S_r(t) = u(t-\tau) \cdot e^{j2\pi f_0(t-\tau)} = u(t-\tau) \cdot e^{j2\pi f_0 t} \cdot e^{-j4\pi f_0 R_0/c} \cdot e^{j2\pi f_d t} \cdot e^{j2\pi(\alpha_d/2)t^2} \quad (1)$$

式中:  $S_r(t)$  为窄带回波信号; 时延  $\tau = 2\left(R_0 - vt - \frac{1}{2}at^2\right)/c$ ,  $R_0$  为目标初始距离,  $v$  为目标初始速度,  $a$  为目标加速度;  $c$  为光速; 多普勒频移  $f_d = f_0 2v/c = 2v/\lambda$ ,  $f_0$  为信号载频,  $\lambda$  为发射射频信号的波长; 调频率  $\alpha_d = 2af_0/c = 2a/\lambda$ 。相对发射信号, 回波信号受到了时延、多普勒频移和调频率因子这 3 个因素的影响。这 3 个因素和目标的相对位置与运动状态均有关系。

## 2 加速度模糊函数

对应式(1)表达的回波信号, 窄带距离-速度-加速度联合模糊函数表述为:

$$A(\tau, f_d, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t-\tau) e^{-j2\pi\left(f_d t + \frac{1}{2}\alpha t^2\right)} dt \quad (2)$$

为分析方便, 以目标加速度  $a$  为变量, 来分析 DTTB 回波信号特性和模糊特性。当相对时延  $\tau$  为零, 即距离向匹配时, 窄带距离-速度-加速度联合模糊函数退化为信号的窄带速度-加速度联合模糊函数:

$$A(0, f_d, a) = \int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 e^{-j2\pi\left[f_d t + \frac{1}{2}\alpha(a)t^2\right]} dt \quad (3)$$

当相对多普勒频移  $f_d$  为零, 即速度向匹配时, 窄带距离-速度-加速度联合模糊函数退化为信号的窄带距离-加速度联合模糊函数:

$$A(\tau, 0, a) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t-\tau) e^{-j\pi\alpha(a)t^2} dt \quad (4)$$

当  $\tau=0$  并且  $f_d=0$ , 两目标距离和速度都匹配时, 窄带距离-速度-加速度联合模糊函数退化为信号的窄带加速度模糊函数:

$$A(0, 0, a) = \int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 e^{-j\pi\alpha(a)t^2} dt \quad (5)$$

式中  $\alpha(a) = 2a/\lambda$ 。

从模糊函数的角度看, 理论上可以根据回波信号与参考信号之间互模糊函数最大值的位置来估计目标的参数。用传统模糊函数, 即只考虑距离和速度的模糊函数, 可以联合估计目标的距离和速度, 当发射信号是周期信号, 考虑距离或速度匹配时, 参考信号也是周期信号, 作模糊函数时产生模糊就变得不可避免。但以距离-速度-加速度联合模糊函数对距离-加速度或者速度-加速度作联合估计时, 由于回波信号和匹配的参考信号都不是周期性的, 可以避免距离和速度模糊的问题。

## 3 目标加速度影响下的 DTTB 回波信号与模糊函数仿真分析

单载波和多载波 2 种模式在符号保护间隔充填方法、调制方式、同步技术等方面有很大不同, 主要区别见表 1,  $P_{\text{head}}$  和  $P_{\text{body}}$  分别为帧头帧体的平均功率。

2 种模式的 DTTB 信号的基带符号率为 7.56 MS/s, 带宽为 7.56 MHz。仿真采用的星座映射模式、帧头模式以及信号帧其他结构信息见表 2。

表 1 DTTB 的 2 种载波应用模式比较  
Table 1 Comparison of two modes of DTTB signals

	single carrier modulation	multi-carrier modulation
carrier modulation	single carrier modulation	TDS-OFDM modulation
frame head	PN595(no phase changes)	PN420 or PN945(phase changes)
dual pilots	option	with
relationship between $P_{\text{head}}$ and $P_{\text{body}}$	$P_{\text{head}}=P_{\text{body}}$	$P_{\text{head}}=2P_{\text{body}}$

表 2 DTTB 信号的主要参数  
Table2 Main parameters of DTTB

	number of carriers	frame head	mapping mode	dual pilots	frame length(symbols)	frame length(duration)/ $\mu$ s
single carrier modulation	1	PN595	16QAM	with	4 375	578.7
multi-carrier modulation	3 780	PN945	16QAM	without	4 725	625

3.1 单载波应用模式

当单载波 DTTB 信号作为发射信号时,经初始距离为 60 km,速度为 500 m/s 的目标反射形成回波,假设加速度为零,目标回波信号的自相关特性见图 1(a),可以看出,信号具有周期性副峰,副峰高度在 -8 dB 左右。考虑目标的加速度的影响(为明显体现加速度对副峰抑制的影响,这里加速度取值较大,加速度大小对副峰抑制能力的分析在 3.3 节中提到),回波信号时域波形不再具有周期性。对回波信号做自相关图,自相关函数呈现极好的图钉形,周期性的副峰得到很好的抑制,见图 1(b)。

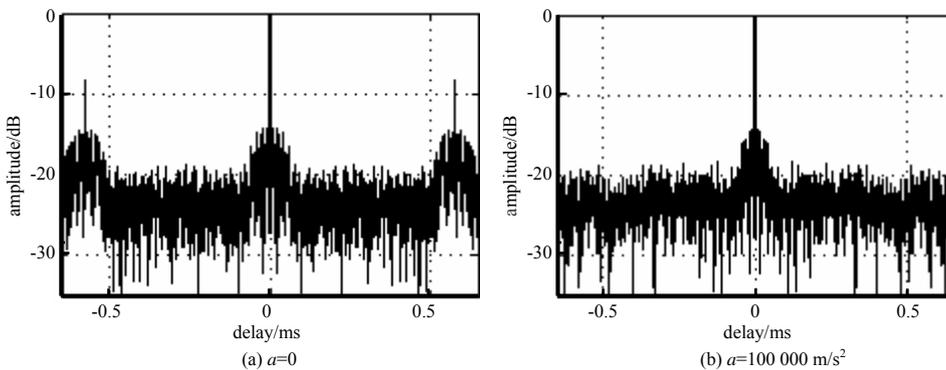


Fig.1 Autocorrelation functions of single-carrier DTTB echoes(signal duration is 0.026 5 s)  
图 1 信号持续时间为 0.026 5 s,目标加速度  $a=0$  和  $a=100\ 000\ \text{m/s}^2$  的单载波 DTTB 回波信号的自相关函数图

可以看出,经过加速度变化的单载波 DTTB 信号回波信号由周期信号变换为非周期信号,周期性副峰也得到抑制。将  $a=0$  时距离为零,速度为零的值归一化即  $A(0,0,0)$  归一化,得到的回波信号距离-速度模糊函数和多普勒切片见图 2。

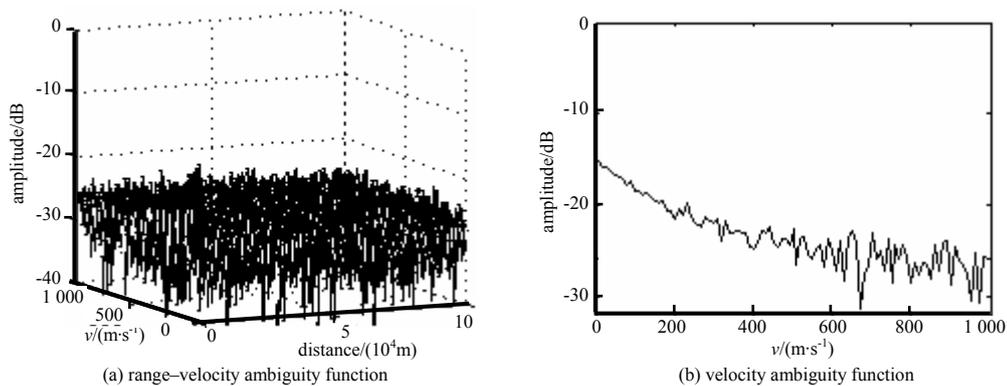


Fig.2 Ambiguity functions of single-carrier DTTB echoes(signal duration is 0.026 5 s, the acceleration is  $100\ 000\ \text{m/s}^2$ )  
图 2 信号持续时间为 0.026 5 s,  $a=100\ 000\ \text{m/s}^2$ ,单载波 DTTB 回波信号的距离-速度模糊函数、速度模糊函数

图 3 为信号的距离-加速度模糊函数图、速度-加速度模糊函数图和加速度模糊函数,直观地显示了加速度对距离和速度方面的影响。

与速度和距离分辨力一样,信号的归一化加速度模糊函数主瓣的 -3 dB 宽度为信号固有的加速度分辨力。加速度分辨力与信号持续时间的平方成反比。信号持续时间越长,加速度分辨力越好,速度分辨力也越好;信号持续时间越短,加速度分辨力值越大,分辨性能越差,速度分辨力也越差<sup>[2,8]</sup>。当信号持续时间由 0.026 5 s 减小为 0.006 6 s,时间长度为原来的 1/4,加速度分辨力从  $1\ 000\ \text{m/s}^2$  变为  $16\ 600\ \text{m/s}^2$ ,分辨性能变差了约 16 倍。图 4 为信号持续时间为 0.006 6 s 时,回波信号的加速度模糊函数。

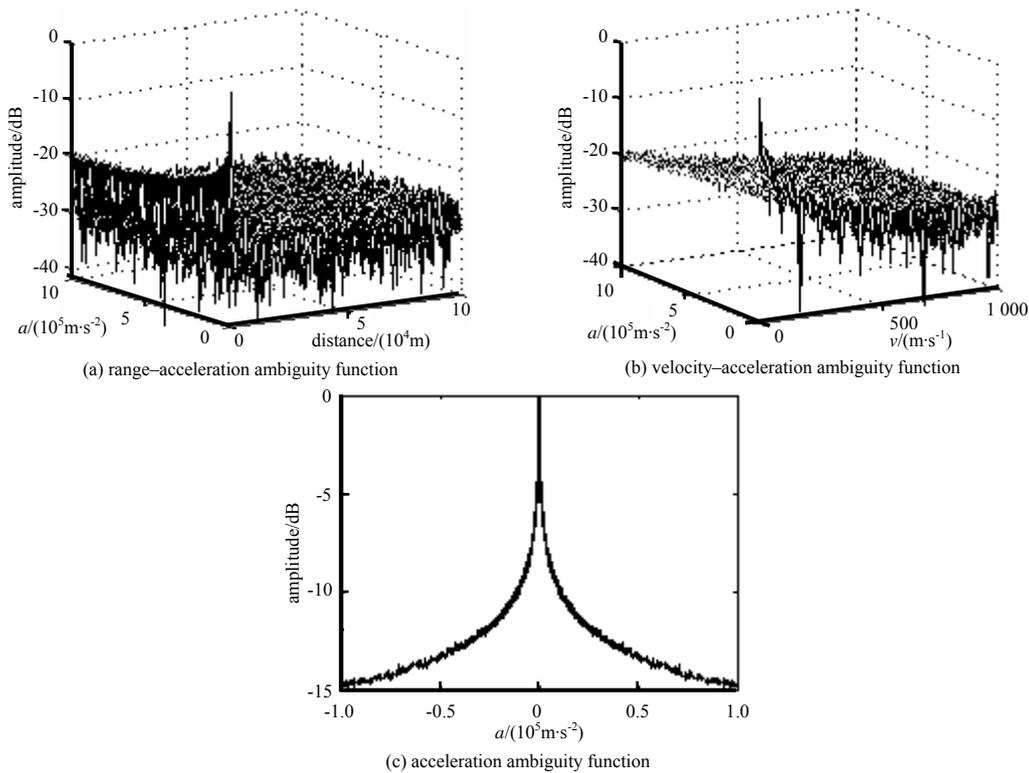


Fig.3 Ambiguity functions of single-carrier DTTB echoes(signal duration is 0.026 5 s)

图 3 信号持续时间为 0.026 5 s, 单载波 DTTB 回波信号的(a) 距离-加速度模糊函数, (b) 速度-加速度模糊函数, (c) 加速度模糊函数

### 3.2 多载波应用模式

当多载波 DTTB 信号作为发射信号时, 经初始距离为 60 km, 速度为 500 m/s 的目标反射形成回波, 假设加速度为零, 目标回波信号的自相关特性见图 5(a), 可以看出, 信号具有周期性副峰, 最高归一化副峰高度在 -8 dB 左右。考虑目标的加速度的影响, 回波信号时域波形不再具有周期性。对回波信号做自相关图, 自相关函数呈现极好的图钉形(零时延处为峰值 0 dB), 周期性的副峰得到很好的抑制, 见图 5(b)。

多载波 DTTB 信号在零时延处存在功率差副峰<sup>[4]</sup>, 经过加速度变化的回波信号由原来的周期信号变换为非周期信号, 功率差副峰也得到抑制, 将  $a=0$  时距离为零, 速度为零的值归一化即  $A(0,0,0)$  归一化, 得到的距离-速度模糊函数见图 6。

图 7 为多载波模式 DTTB 信号的距离-加速度模糊函数图、速度-加速度模糊函数图和加速度模糊函数图, 直观地显示了加速度对距离和速度模糊特性副峰的抑制。

从图 3(c)和图 7(c)对比来看, 多载波 DTTB 信号的速度(多普勒)切片旁瓣较单载波信号高, 加速度模糊函数旁瓣较多, 波动较大, 两种信号形式的加速度主瓣宽度一样, 差别带来的影响就体现在旁瓣上。如同距离分辨常数和速度分辨常数一样, 全面考虑主瓣和旁瓣的影响, 定义一个加速度分辨常数, 来区分信号形式对加速度分辨力的影响。

定义加速度分辨常数为:

$$A_a = \int_{-\infty}^{\infty} |\chi(0, \alpha)|^2 d\alpha / |\chi(0, 0)|^2 \quad (6)$$

在此定义下可以得出, DTTB 的 2 种信号形式的加速度分辨常数相比, 多载波 DTTB 信号较大, 单载波 DTTB 信号加速度分辨力较优。

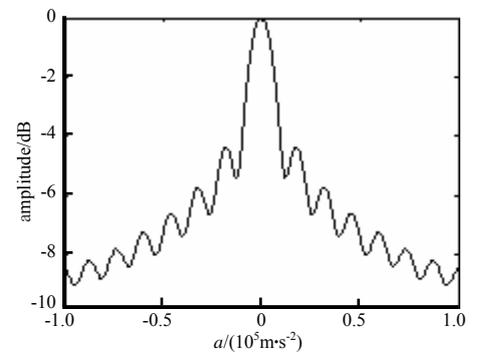


Fig.4 Acceleration ambiguity function of single-carrier DTTB echoes(signal duration is 0.006 6 s)

图 4 单载波 DTTB 回波信号的加速度模糊函数 (信号持续时间为 0.006 6 s)

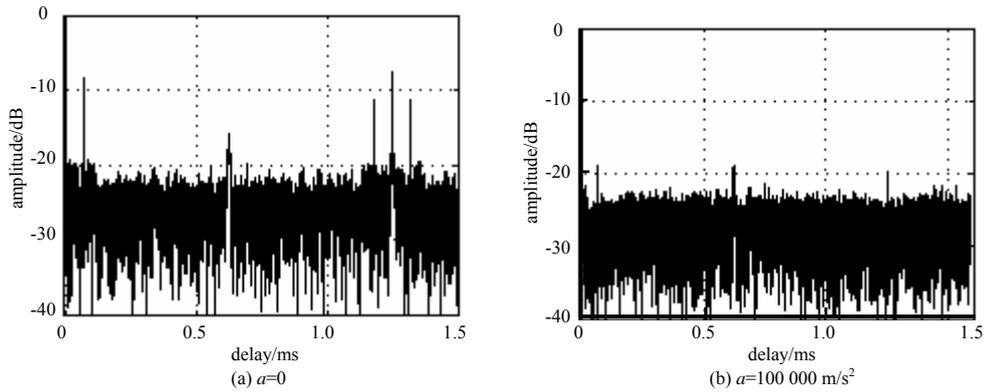


Fig.5 Autocorrelations function of multi-carrier DTTB echoes(signal duration is 0.026 5 s)

图 5 信号持续时间为 0.026 5 s, 目标加速度(a)  $a=0$ , (b)  $a=100\,000\text{ m/s}^2$  的多载波 DTTB 回波信号自相关函数图

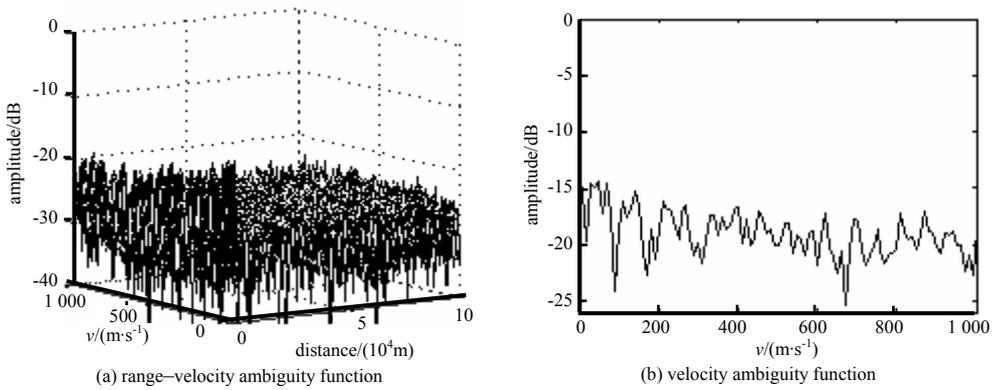


Fig.6 Ambiguity functions of multi-carrier DTTB echoes(signal duration is 0.026 5s,  $a=100\,000\text{ m/s}^2$ )

图 6 信号持续时间为 0.026 5 s, 目标加速度  $a=100\,000\text{ m/s}^2$ , 多载波 DTTB 回波信号的(a) 距离-速度模糊函数, (b) 速度模糊函数

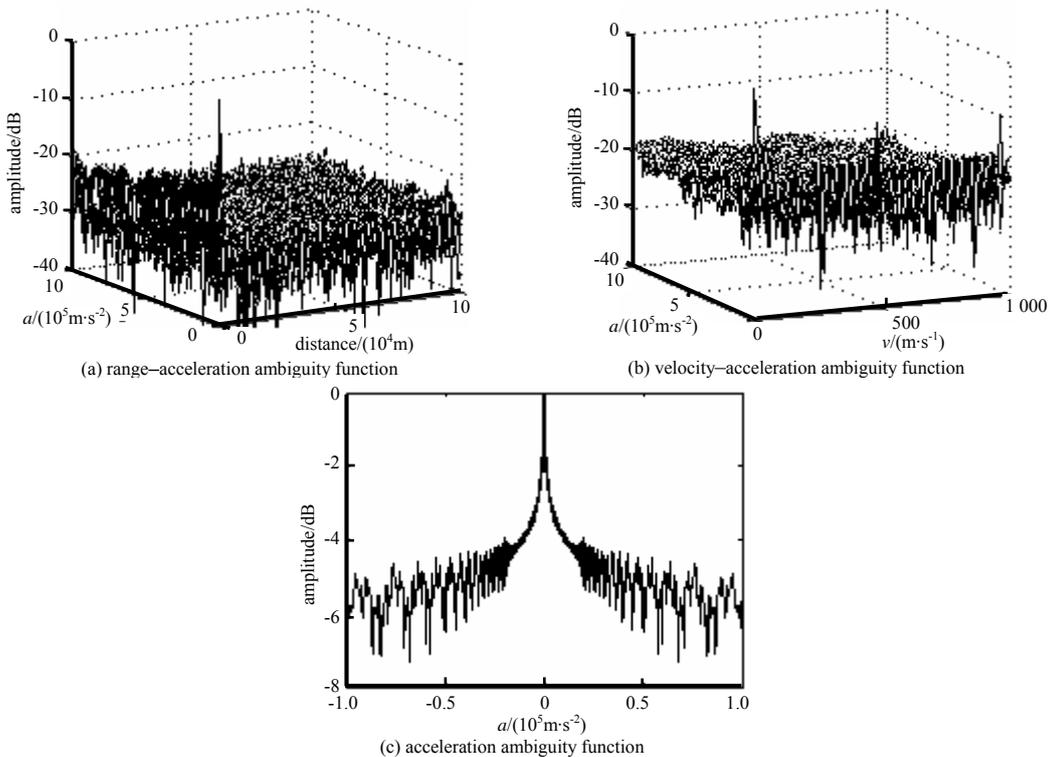


Fig.7 Ambiguity function of multi-carrier DTTB echoes(signal duration is 0.026 5 s)

图 7 信号持续时间为 0.026 5 s, 多载波 DTTB 回波信号的(a) 距离-加速度模糊函数, (b) 速度-加速度模糊函数, (c) 加速度模糊函数

### 3.3 性能分析

以单载波 DTTB 信号为代表, 分析 DTTB 信号中信号持续时间和目标加速度的变化对副峰抑制的影响。这里定义副峰抑制前后的幅值差为副峰抑制幅度。图 8 中, 信号持续时间不同, 副峰抑制的幅度也不同。在一定范围内, 随着信号持续时间的缩短, 加速度对距离副峰的抑制能力减弱。在信号持续时间一定的情况下, 随着加速度的增大, 对时延副峰的抑制能力一开始呈增强趋势, 但超过一定范围后, 即使再增加加速度, 抑制能力也不再增强。

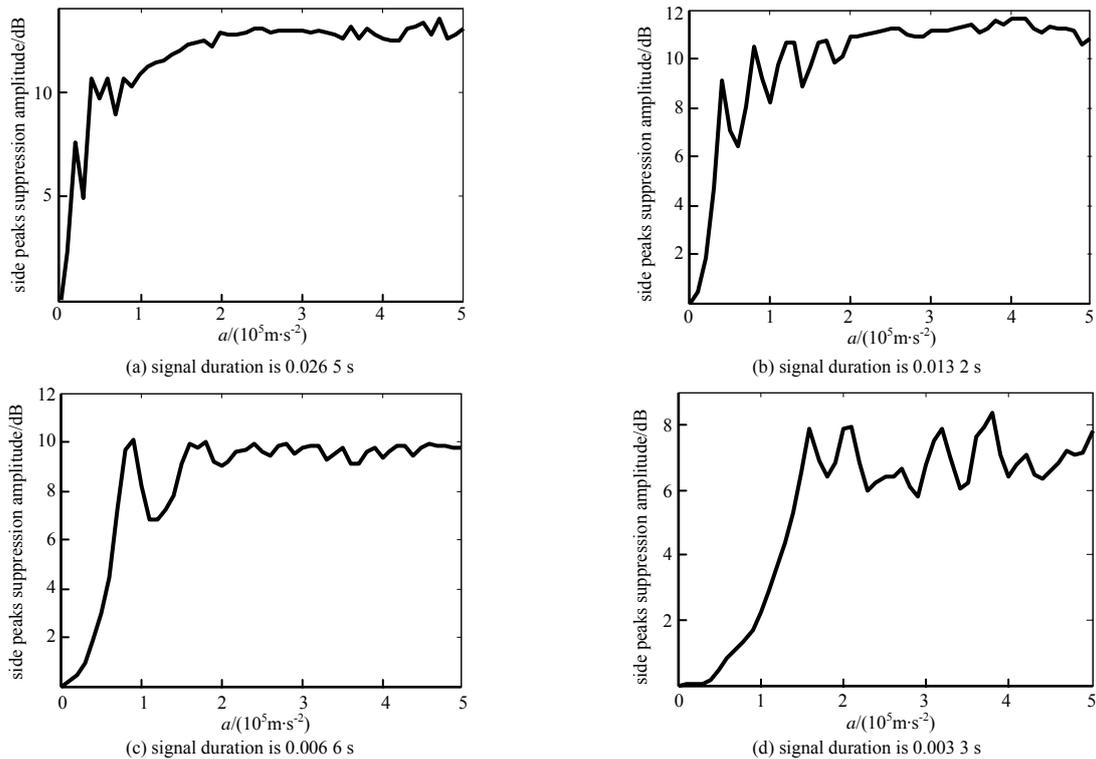


Fig.8 Performance changes of side peaks suppression

图 8 信号持续时间分别为 0.026 5s, 0.013 2s, 0.006 6s 和 0.003 3s 时的副峰抑制性能变化

在加速度一定的情况下, 信号持续时间越长, 抑制能力越优越, 并且信号持续时间相同时加速度越大, 副峰抑制的幅度越大, 见图 9。

由图 9 可以看出, 当目标加速度为  $10^3 \text{ m/s}^2$ , 并且信号持续时间约为 0.4 s, 可以将副峰抑制至  $-13 \text{ dB}$  (归一化幅度为 0.05) 以下, 即副峰抑制幅度在 5 dB 以上。通过仿真可以看到一种趋势, 若目标加速度较小, 可以通过增加信号持续时间, 来达到抑制 DTTB 信号模糊函数副峰的目的。因此针对目前所面临的侦察的目标加速度越来越大的背景压力下, DTTB 信号利用探测目标本身的加速度进行副峰抑制的思路是切实可行的。

## 4 结论

当测量静止目标或相对速度恒定的目标时, 距离和速度模糊无法避免。但是当目标与接收天线有相对加速度时, 回波信号变为非周期的, 这个特征会抑制信号自相关函数副峰的周期性。本文从这个角度出发, 探索利用目标的加速度来进行副峰抑制。从初步的仿真分析可以看到, 目标与接收天线之间的相对加速度能有效改善目标探测距离和速度的模糊问题。因此, 利用目前日益增大的目标加速度来进行副峰抑制的算法具有长远的理论和应用意义。

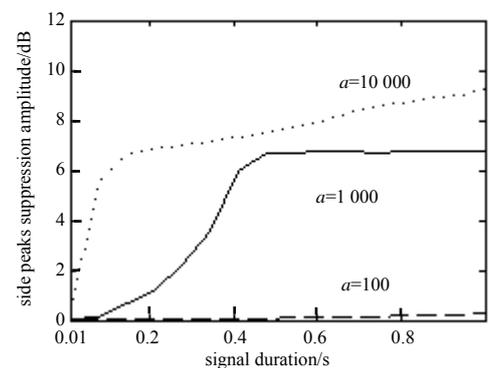


Fig.9 Performance changes of side peaks suppression as signal duration increases with different accelerations

图 9 不同加速度下的副峰抑制随信号持续时间变化

## 参考文献:

- [1] 国家广电总局广播电视规划院. GB 20600-2006 数字电视地面广播传输系统帧结构,信道编码和调制[S]. 国家标准化管理委员会, 2006. (GB 20600-2006 Channel Coding and Modulation for Digital Television Terrestrial Broadcasting System[S]. 2006.)
- [2] 林茂庸,柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京:国防工业出版社, 1984. (LIN Maoyong,KE Youan. Radar Signal Theory[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1984.)
- [3] Woodward P M. Probability and information theory with applications to radar[M]. London:Pergamon Press, 1953.
- [4] GAO Zhiwen,TAO Ran,WANG Yue. Analysis and side peaks identification of Chinese DTTB signal ambiguity functions for passive radar[J]. Science in China Series F:Information Sciences, 2009,52(8):1409-1417.
- [5] Saini R,Cherniakov M. DTV signal ambiguity function analysis for radar application[J]. IEEE Proc. Radar Sonar Navig, 2005, 152(3):133-14.
- [6] 万显荣,岑博,程丰,等. 基于 CMMB 的外辐射源雷达信号模糊函数分析与处理[J]. 电子与信息学报, 2011,33(10):2489-2493. (WAN Xianrong,CEN Bo,CHENG Feng,et al. Ambiguity function analysis and processing of CMMB signal based passive radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011,33(10):2489-2493.)
- [7] 张各各,王俊,刘玉春. 一种基于数字电视地面广播照射源的外辐射源雷达快速杂波相消算法[J]. 电子与信息学报, 2013,35(1):36-40. (ZHANG Gege,WANG Jun,LIU Yuchun. A fast cancellation algorithm for DTTB-based passive radar system[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2013,35(1):36-40.)
- [8] 张卫,唐希源,顾红,等. OFDM 雷达信号模糊函数分析[J]. 南京理工大学学报:自然科学版, 2011,35(4):513-518. (ZHANG Wei,TANG Xiyuan,GU Hong,et al. Ambiguity function analysis of OFDM radar signals[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology:Natural Science, 2011,35(4):513-518.)
- [9] 万显荣,赵志欣,柯亨玉,等. 基于 DRM 数字调幅广播的高频外辐射源雷达实验研究[J]. 雷达学报, 2012,1(1):11-18. (WAN Xianrong,ZHANG Zhixin,KE Hengyu,et al. HF passive bistatic radar based on DRM illuminators[J]. Journal of Radars, 2012,1(1):11-18.)
- [10] 刘朝军,王伟,邱兆坤,等. 基于 DDS 的宽带雷达回波信号模拟技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005,27(9):1497-1499. (LIU Zhaojun,WANG Wei,QIU Zhaokun,et al. Research on the simulation of the characteristic signal of the wide band radar target based on DDS[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005,27(9):1497-1499.)
- [11] ZHAO Hongzhong,FU Qiang. Performance analysis of acceleration resolution for radar signal[J]. Science in China:Technological Sciences, 2003,46(7):449-458.
- [12] 胡文,刘中,李春彪. 距离-速度-加速度联合模糊函数计算:信号动力学表示方法[J]. 电子与信息学报, 2008,30(11):2670-2673. (HU Wen,LIU Zhong,LI Chunbiao. Calculation on range-velocity-acceleration ambiguous functions using signal dynamical representation[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008,30(11):2670-2673.)

## 作者简介:



袁春姍(1988-),女,山东省菏泽市人,硕士,主要研究方向为信号处理.email:yuanchen513@126.com.