2013年10月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2013)05-0741-06

# DTTB的双基地雷达模糊函数及目标分辨力分析

袁春姗1,郭 骏2,唐济远1

(1.昆明船舶设备研究试验中心,云南 昆明 650051; 2.中海石油深海开发有限公司 南海深水天然气开发项目组,广东 深圳 518052)

摘 要:通过双基地模糊函数分析比较了数字电视地面广播(DTTB)标准下单载波和多载波 2 种信号形式分别应用于双基地雷达的性能及目标分辨特性,研究了不同接收角度下,DTTB系统 2 种信号应用模式的模糊函数图,得到了双基地模糊函数形式下副峰的相对位置、产生原因以及与单基地模糊函数副峰位置的关系。分析了双基地雷达应用中 DTTB 信号的速度分辨力和距离分辨力,指出 DTTB 标准下单载波与多载波信号形式的双基地雷达分辨力大致相同,单载波形式的分辨力相对更优。

# Analysis of ambiguity function and performance of target resolution of DTTB signal in bistatic radar

YUAN Chun-shan<sup>1</sup>, GUO Jun<sup>2</sup>, TANG Ji-yuan<sup>1</sup>

(1.Kunming Shipborne Equipment Reserch and Test Center, Kunming Yunnan 650051, China; 2.CNOOC deepwater Development Co. Ltd. South China Sea Deep Water Gas Development Project Management Team, Shenzhen Guangdong 518052, China)

**Abstract:** The performances of two modes of digital broadcast signals in Digital Television Terrestrial Broadcasting(DTTB) standard applied in bistatic radar are analyzed and compared by ambiguity function, as well as their target resolution characteristics. The ambiguity functions of single carrier and multi-carrier of DTTB system are studied in different receiving angles. The relative positions of secondary peaks in bistatic ambiguity functions, and the causes of secondary peaks generation are obtained. The relative relationships of the secondary peak positions between the monostatic and the bistatic radar are analyzed, and two modes of signals exhibit approximately the same resolution while the single carrier DTTB signal has better resolution.

Key words: Digital Television Terestrial Broadcasting; bistatic radar; ambiguity function; resolution

外辐射源雷达系统是一种利用电视、调频广播等非合作辐射源作为照射源的双/多基地雷达系统。双基地雷达以抗电子侦察、抗干扰、抗摧毁、抗超低突防、抗隐形的特点在电子战中具有较大的优势和潜力。目前在外辐射源雷达系统的研究中,所选照射源有调频广播信号、卫星信号、手机信号、数字电视地面广播(DTTB)信号等<sup>[1-6]</sup>,其中DTTB信号作为非协作照射源,具有3方面的优势:高发射能量、巨大的覆盖面积和较宽的带宽<sup>[4]</sup>。目前,国内外对取得广泛应用的欧标数字视频地面广播(Digital Video Broadcasting-Terrestrial, DVB-T)信号应用于双基地雷达的研究很多<sup>[4,7-8]</sup>。与欧标 DVB-T 相比,我国 DTTB标准在符号保护间隔充填方法、调制方式、同步技术等方面存在本质的不同,DTTB与 DVB-T 信号在结构以及自相关程度方面有较大差异。DVB-T 系统采用编码正交频分复用(Coded Orthogonal Frequency Divison Multiplexing, COFDM)的多载波调制体制,有2种应用模式:2k模式和8k模式。DTTB标准包含单载波和多载波2种信号形式。文献[9]指出,DTTB信号的单基地模糊函数,位用于双基地雷达应具有更好的探测性能。所以进一步研究 DTTB信号应用在双基地雷达的性能,比较单载波、多载波2种信号形式的性能是十分必要的。目前已有对 DTTB 信号单基地模糊函数特性的分析研究<sup>[9]</sup>,但由于外辐射源雷达等双基地雷达几何配置严重影响着时延和多普勒频移的测量,

收稿日期: 2012-08-21; 修回日期: 2012-11-17

目前分析雷达波形的工具多采用双基地雷达距离-速度模糊函数<sup>[10]</sup>,代替 Woodward<sup>[11]</sup>提出的单基地模糊函数。 本文将着重研究以下 2 个方面: a) DTTB 信号的双基地模糊函数图中副峰出现的相对位置、产生原因以及与单基 地模糊函数副峰位置的关系; b) DTTB 标准下单载波与多载波信号形式的双基地雷达的速度、距离分辨力分析与 比较。

### 1 模糊函数

双基地雷达测量参数与双基地几何配置有关,北坐标系形式下双基地平面几何关系如图 1 所示<sup>[12]</sup>。模糊函数定义为:

$$\chi\left(R_{\mathrm{R}_{\mathrm{H}}}, R_{\mathrm{R}_{\mathrm{a}}}, V_{\mathrm{H}}, V_{\mathrm{a}}, \theta_{\mathrm{R}}, L\right) = \begin{vmatrix} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}\left(t - \tau_{\mathrm{a}}\left(R_{\mathrm{R}_{\mathrm{a}}}, \theta_{\mathrm{R}}, L\right)\right) \tilde{f}^{*}\left(t - \tau_{\mathrm{H}}\left(R_{\mathrm{R}_{\mathrm{H}}}, \theta_{\mathrm{R}}, L\right)\right) \times \\ \exp\left[-j\left(\omega_{\mathrm{D}_{\mathrm{H}}}\left(R_{\mathrm{R}_{\mathrm{H}}}, V_{\mathrm{H}}, \theta_{\mathrm{R}}, L\right) - \omega_{\mathrm{D}_{\mathrm{a}}}\left(R_{\mathrm{R}_{\mathrm{a}}}, V_{\mathrm{a}}, \theta_{\mathrm{R}}, L\right)\right) t \right] \mathrm{d}t \end{vmatrix}$$
(1)

式中:

$$\tau \left( R_{\rm R}, \theta_{\rm R}, L \right) = \left[ R_{\rm R} + \sqrt{R_{\rm R}^2 + L^2 + 2R_{\rm R}L\sin\theta_{\rm R}} \right] / c \tag{2}$$

$$\omega_{\rm D}\left(R_{\rm R}, V\cos\phi, \theta_{\rm R}, L\right) = 2\frac{\omega_{\rm c}}{c}V\cos\phi\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{R_{\rm R} + L\sin\theta_{\rm R}}{2\sqrt{R_{\rm R}^2 + L^2 + 2R_{\rm R}L\sin\theta_{\rm R}}}}$$
(3)

式中:  $\tilde{f}$  为发射信号的复包络;  $\tau$  为目标回波延时;  $R_{\rm R}$  为目标到接 收机的初始距离;  $\theta_{\rm R}$  为接收角<sup>[12]</sup>; L 为基线距离;  $R_{\rm R_{H}}$ ,  $R_{\rm R_{a}}$ ,  $V_{\rm H}$ ,  $V_{\rm a}$  表 示以接收站为参考点的 2 个目标的距离和速度;  $\omega_{\rm c}$  为载波频率; V 为目标速度;  $\phi$  为目标与双基地二等分线方向的夹角,  $V \cos \phi$  为目标速度在双基地二等分线方向上的投影;  $\omega_{\rm D}$  为多普勒频移。



Fig.1 Plane geometry of bistatic radar systems 图1 双基地雷达平面几何关系图

## 2 DTTB 的双基地模糊函数分析

### 2.1 DTTB 信号的双基地模糊函数与单基地模糊函数的副峰位置关系

DTTB 信号描述为:

$$S(t) = \operatorname{Re}\left\{\exp\left(j2\pi F_{c}t\right) \times \left[h(t) \otimes Frame(t)\right]\right\}$$
(4)

式中: S(t)为射频信号;  $F_c$ 为载波频率; h(t)为平方根升余弦滤波器的脉冲成形函数; Frame(t)为组帧后的基带信号,由帧头和帧体组成。

借助文献[9]讨论得出的 DTTB 信号单基地模糊函数下,时延、多普勒频移副峰的相对位置与信号参数之间 的关系,利用式(2)~式(3)所示的时延、多普勒频移与几何配置参数、目标参数之间的关系,可以得到距离、速度 与几何配置、时延、多普勒频移的关系。进而,推导出 DTTB 信号双基地距离-速度模糊函数副峰的相对位置及 与单基地模糊函数副峰位置的关系。下面通过公式推导的方式指出副峰所在的位置以及产生原因。

将式(2)变形,得到目标与接收端距离 R<sub>R</sub>随目标回波延时 r 变化的关系,表示为:

$$R_{\rm R}\left(\tau, L, \theta_{\rm R}\right) = \frac{\tau^2 c^2 - L^2}{2\tau c + 2L\sin\theta_{\rm R}} \tag{5}$$

同理,根据式(3)得到目标速度在双基地二等分线方向上的投影 V cos ø 随目标多普勒频移变化的关系式:

$$V\cos\phi = \frac{\omega_{\rm D}}{2\omega_{\rm c}}c \left/ \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{R_{\rm R} + L\sin\theta_{\rm R}}{2\sqrt{R_{\rm R}^2 + L^2 + 2R_{\rm R}L\sin\theta_{\rm R}}}} \right.$$
(6)

根据模糊函数的定义知道,双基地模式的相对延时即两目标回波信号延时差 $\tau = \tau_{\rm H} - \tau_{\rm a}$ ,相对多普勒频移  $f_{\rm d} = \omega_{\rm D}/2\pi = \left(\omega_{\rm D_{\rm H}} - \omega_{\rm D_{\rm a}}\right)/2\pi$ ,在 $\tau$ , $f_{\rm d}$ 取单基地模糊函数图的副峰位置所对应的值时,在双基地模糊函数图里就会在相应的速度、距离点上出现副峰。

假设 $(\tau_{s}, f_{ds})$ 为单基地模糊函数图的副峰位置坐标,相应的双基地模糊函数图则会在 $(R_{RB}, V_{B})$ 出现副峰。

$$R_{\rm RB}\left(\tau_{\rm B}, L, \theta_{\rm R}\right) = \frac{\tau_{\rm B}^2 c^2 - L^2}{2\tau_{\rm B} c + 2L \sin \theta_{\rm R}} \tag{7}$$

743

式中 $\tau_{\rm B} = \tau_{\rm s} + \tau_{\rm a}$ 。

$$V_{\rm B}\left(\omega_{\rm DB}, R_{\rm RB}, L, \theta_{\rm R}\right) = \frac{\omega_{\rm DB}}{2\omega_{\rm c}} c \left/ \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{R_{\rm RB} + L\sin\theta_{\rm R}}{2\sqrt{R_{\rm RB}^2 + L^2 + 2R_{\rm RB}L\sin\theta_{\rm R}}}} \right.$$
(8)

式中 $\omega_{DB} = 2\pi f_{ds} + \omega_{D_a}$ 。

例如,单载波应用模式帧头副峰出现位置<sup>[9]</sup>为:

$$P_{\text{Head2}} = \left\{ \left( lT_s, \frac{i}{T_s} \right) | l = 1, 2, \cdots, 215; \quad i \in N \right\}$$
(9)

由式(7)、式(8)得出 DTTB 的双基地模糊函数由帧头产生的副峰位置集合为:

$$P_{\text{Head2}} = \left\{ \left( R_{\text{RB}} \left( lT_{\text{s}} + \tau_{\text{a}}, L, \theta_{\text{R}} \right), V_{\text{B}} \left( 2\pi i / T_{\text{s}} + \omega_{\text{Da}}, R_{\text{RB}}, L, \theta_{\text{R}} \right) \right) \mid l = 1, 2, \cdots, 15; \quad i \in N \right\}$$
(10)

# 2.2 MATLAB 仿真分析

仿真信号时间长度为 625×30 μs,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如表 1 所示。本文选用载波频率为 500 MHz。以下讨论均假设目标与双基地二等 分线方向的夹角 φ=0。

衣I DI I D的土安多奴						
Table1 Main parameters of DTTB						
	number of carriers	frame head	mapping mode	dual pilots	frame length(symbols)	frame length(duration)/µs
single carrier modulation	1	PN595	16QAM	with	4 375	578.7
multi-carrier modulation	3 780	PN945	16QAM	without	4 725	625.0

主1 DTTD 的 十 西 矣 粉

仿真假设基线距离 *L*=100 km,目标与接收端的距离  $R_{Ra} = 60$  km,目标速度  $V_a = 500$  m/s。根据式(1)~式(4),图 2、图 3 分别给出了  $\theta_R = -\pi/6$ ,  $\theta_R = \pi/3$ ,  $\theta_R = -\pi/2$  情况下 2 种应用模式的模糊图。



Fig.2 Bistatic ambiguity function plot of single carrier DTTB signal(with dual pilots) 图2 单载波DTTB信号(有双导频)的双基地模糊图



Fig.3 Bistatic ambiguity function plot of multi-carrier DTTB signal 图3 多载波DTTB信号的双基地模糊图

如图 2(b)所示,双基地模式下,当 L=100 km,  $\theta_{R} = \pi/3$ 时,以距离和速度为变量的模糊函数将在(148 320,1 017.3) 出现副峰, 此副峰对应的时延和多普勒分别为 T<sub>s</sub>,1/T<sub>s</sub>。

 $\theta_{\rm R} = -\pi/2$ 时,从式(2)~式(3)可知,不管目标在基线上的哪个位置,目标的速度多大,延时都为L/c,多普勒 为 0。所以 R<sub>R</sub>小于 L 时,此时相对延时为 0,相对多普勒频移为 0,模糊函数达到最大为 1。R<sub>R</sub>大于 L 时:

$$\sqrt{R_{\rm R}^2 + L^2 + 2R_{\rm R}L\sin\theta_{\rm R}} = R_{\rm R} - L \tag{11}$$

则  $\tau = (2R_{\rm R} - L) / c$ ,  $\omega_{\rm D} = 2 \frac{\omega_{\rm c}}{c} V \cos \phi$ , 延时和多普勒频移与距离和速度变成线性关系。这时, 以距离和速度为参量 的双基地模糊函数副峰位置变为 $\left(\frac{\tau_{\rm H}c+L}{2}, \frac{\omega_{\rm D_a}c}{2\omega_{\rm c}}\right)$ 。如图 2(c)、图 3(c)所示,目标处于收发基线上时,双基地雷达

失去分辨能力。

#### DTTB 信号的双基地雷达分辨力 3

### 3.1 速度分辨力

双基地雷达的速度分辨力是由双基地雷达的多普勒分辨力引出的,是为了获得足够的多普勒分辨力所需要的 投影在双基地角平分线上的两目标之差。与单基地雷达类似, 双基地雷达多普勒分辨力定义为: 角度和距离相同 条件下,接收基地能够分辨两目标回波之间的最小多普勒频率间隔,通常取为1/T,其中T为接收机相干处理周 期<sup>[13]</sup>(在这里为信号总时间宽度)。双基地雷达的速度分辨力可以通过式(12)<sup>[10,14]</sup>求出:

$$\Delta \upsilon = \lambda / (2T \cos(\beta/2)) \tag{12}$$

式中  $\cos(\beta/2) = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{R_{\rm R} + L\sin\theta_{\rm R}}{2\sqrt{R_{\rm R}^2 + L^2 + 2R_{\rm R}L\sin\theta_{\rm R}}}}$ 

由式(12)可以看出,速度分辨力与信号形式无关,与信号的波长、总时间宽度以及双基地的几何配置相关。 并且,随着基线距离 L 增加,选择的信号波长 k 越长,双基地雷达的速度分辨力越差。反之,随着时间宽度 T 变长,目标与接收端距离 R<sub>R</sub>变大,北坐标系下接收角 θ<sub>a</sub> 越大,速度分辨力越好。因此,在信号时间宽度、载频 以及几何配置一样的情况下,不同信号的双基地速度分辨力相等。

这种方法只考虑信号的时宽,忽略了信号形式的差别对信号持续时宽的影响,持续时宽表征着速度模糊函数

与冲击函数的相似程度,通常用 $T_e$ 表示,  $T_e = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 dt\right]^2}{\int_{\infty}^{\infty} |u(t)|^4 dt}$ , 由于单载波信号与多载波信号结构差别较大,对

模糊函数的影响较大。全面考虑主瓣和旁瓣对速度分辨的影响, 仿真时间长度为 T(0.018 8 s)的单载波信号的持 续时宽为 0.014 7 s,相同时间长度 T(0.018 8 s)的多载波信号的持续时宽为 0.011 2 s。如果将最小多普勒频率间 隔用T表示,可以得到,不同调制方式的 DTTB 信号的双基地速度分辨力大致相等,单载波信号的固有速度分 辨力较多载波信号好, 这从单基地模糊函数中可以直观看出。



Fig.4 Bistatic radar velocity resolution of DTTB signal ( $R_a=60 \text{ km}, \theta_R=-\pi/6$ ) 图4 DTTB信号的双基地速度分辨力( $R_a=60 \text{ km}, \theta_R=-\pi/6$ )

利用数值计算方法,计算 DTTB 信号的双基地速度模糊函数主瓣的 3 dB 宽度得到双基地雷达的速度分辨力, 由于 DTTB 的 2 种信号形式的不同,影响副峰的分布,所以 3 dB 主瓣宽度得到的速度分辨力相同,2 种形式的 DTTB 信号随基线距离 *L* 变化示意图如图 4 所示。可以看出,仿真结果与理论变化趋势保持一致。当 *L* 减少至零 时, Δ*v*=λ/2*T*,双基地模式退化为单基地模式,此时 DTTB 信号的理论速度分辨力达到 16.0 m/s,仿真结果为 19.2 m/s。考虑信号形式差别的情况下,单载波 DTTB 信号的理论速度分辨力为 20.36 m/s,多载波 DTTB 信号的 理论速度分辨力为 26.72 m/s。

3.2 距离分辨力

双基地雷达距离分辨力定义为双基地雷达能分辨的 2 个目标之间的最小距离间隔。由于收发分置,在双基地 接收机输出端得到的时间间隔为 τ 的 2 个回波,其对应的实际空间距离不为 cτ/2,而是处于距离和之差为 cτ/2 的 两等距椭圆上。双基地雷达的实际空间距离分辨力估算方式,文献[14]已经给出,这里只讨论接收视线上的双基 地雷达距离分辨力。相应的接收视线上的距离分辨力表示为<sup>[10,13-14]</sup>:

$$\Delta R_{\rm R} \approx c\tau / (2\cos^2(\beta/2)) \tag{13}$$

其中  $\tau$  通常取 1/B, B 为信号带宽, B=7.56 MHz,  $\cos(\beta/2) = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{R_{\rm R} + L\sin\theta_{\rm R}}{2\sqrt{R_{\rm R}^2 + L^2 + 2R_{\rm R}L\sin\theta_{\rm R}}}}$ , 该近似式是距离分辨

力的一种保守估算。由该式所得的近似值始终大于或等于精确值。

由式(13)可以看出,距离分辨力与信号均方根带宽和双基地几何配置相关。并且,随着基线距离 L 增加,双基地雷达的距离分辨力越差。反之,随着信号带宽 B 变大,目标与接收端距离  $R_{\rm R}$  变大,北坐标系下接收角  $\theta_{\rm R}$  越大,距离分辨力越好。因此,在信号频域宽度、载频以及几何配置一样的情况下,不同信号的双基地距离分辨力相等。

这种方法同样只考虑信号的时宽,忽略了信号形式的差别对频谱持续宽度的影响,频谱持续宽度表征着速度

模糊函数与冲击函数的相似程度,通常用  $B_e$ 表示,  $B_e = \frac{|\chi(0,0)|^2}{\int_{\infty}^{\infty} |\chi(\tau,0)|^2 d\tau}$ , 经计算得出, 仿真时间长度为 T(0.018 8 s),

带宽为 B 的单载波信号的频谱持续宽度为 6.58×10<sup>6</sup> Hz,相同时间长度,相同带宽的多载波信号的频谱持续宽度 为 6.21×10<sup>6</sup> Hz。如果将最小时延间隔用 B<sub>e</sub>表示,可以得到,不同调制方式的 DTTB 信号的双基地距离分辨力大 致相等,单载波信号的固有距离分辨力较多载波信号好,这从单基地模糊函数中也可以直观看出。



Fig.5 Bistatic radar range resolution of DTTB signal(L=100 km, %=-π/6) 图5 DTTB信号的双基地距离分辨力

利用数值计算的方法得到的双基地雷达的距离分辨力随目标离接收端的距离变化示意图如图 5 所示。可以看出, 仿真结果与理论相符。当 L 为零时,  $\Delta R_{\rm R} = c\tau/2$ , 双基地模式退化为单基地模式。此时 DTTB 信号的理论速度分辨力达到 19.84 m, 仿真结果为 19.9 m/s。考虑信号形式差别的情况下,单载波 DTTB 信号的理论距离分辨力为 22.8 m, 多载波 DTTB 信号的理论距离分辨力为 24.16 m。

746

本文首先分析了 DTTB 信号在双基地模糊函数图中副峰出现的相对位置、产生原因以及与单基地模糊函数副 峰之间的位置关系,为分析和抑制副峰,从而避免副峰干扰引起的虚警提供了依据。其次,以双基地速度模糊函 数为工具,讨论了基于 DTTB 信号的双基地雷达速度和距离分辨力,分析信号形式对距离、速度分辨力的影响。 得出以下结论:相同几何配置,相同时间长度的条件下,不同调制方式的 DTTB 信号双基地雷达分辨力大致相等, 单载波 DTTB 信号的距离和速度分辨力相对更优。这为进一步研究双(多)基地雷达参数估计性能和双基地雷达布 站提供一定的理论参考。

# 参考文献:

- Griffiths H D,Long N R W. Television-based bistatic radar[J]. IEE Proceedings F,Communications,Radar and Signal Processing, 1986,133(7):649-657.
- [2] 张平川,黎步银,黄兆祥,等. 基于机会发射的手机雷达及其关键技术探讨[J]. 信息与电子工程, 2008,6(6):433-436.
   (ZHANG Pingchuan,LI Buyin,HUANG Zhaoxiang, et al. Probe into the Cell-phone Radar Based on the Opportunity Illuminators and its Key Techniques[J]. Information and Electronic Engineering, 2008,6(6):433-436.)
- [3] Howland P E, Maksimiuk D, Reitsma G. FM radio based bistatic radar[J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2005,152(3):107-115.
- [4] Saini R, Cherniakov M. DTV signal ambiguity function analysis for radar application[J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2005,152(3):133-142.
- [5] Tan D K P,Sun H,Lu Y,et al. Passive radar using Global System for Mobile communication signal:theory,implementation and measurements[J]. IEE Proceedings Radar,Sonar and Navigation, 2005,152(3):116-123.
- [6] 刘立东,袁伟明,吴顺君,等. 基于 GPS 照射源的天地双基地雷达探测系统[J]. 电波科学学报, 2004,19(1):109-113.
   (LIU Lidong,YUAN Weiming,WU Shunjun, et al. Bistatic radar system based on GPS illumination[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004,19(1):109-113.)
- [7] 高志文,陶然,单涛. DVB-T 辐射源雷达信号模糊函数的副峰分析与抑制[J]. 电子学报, 2008,36(3):505-509. (GAO Zhiwen,TAO Ran,SHAN Tao. Side Peaks Analysis and Suppression of DVB-T Signal Ambiguity Function for Passive Radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2008,36(3):505-509.)
- [8] Daun M,Koch W. Multistatic target tracking for non-cooperative illuminating by DAB/DVB-T[C]//OCEANS 2007. Europe Aherdeen:[s.n], 2007:1-6.
- [9] 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.
- [10] Tsao T,Slamani M,Varshney P,et al. Ambiguity function for a bistatic radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997,33(3):1041-1051.
- [11] Woodward P M. Probability and information theory:with applications to radar[M]. London:Artech House, 1953.
- [12] Jackson M C. The geometry of bistatic radar systems[J]. IEE Proceedings F,Communications,Radar and Signal Processing, 1986,133(7):604-612.
- [13] 张直中. 雷达信号的选择与处理[M]. 北京:国防工业出版社, 1979. (ZHANG Zhizhong. The selection and processing of radar signals[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1979.)
- [14] 杨振起,张永顺,骆永军.双(多)基地雷达系统[M].北京:国防工业出版社, 1998. (YANG Zhenqi,ZHANG Yongshun, LUO Yongjun. Bistatic(multistatic) radar systems[M]. Beijing:Press of National Defence Industry, 1998.)

#### 作者简介:



**袁春姗**(1988-), 女,山东省菏泽市人,硕 士,主要研究方向为雷达信号处理.email:yuan chen513@126.com. **郭** 骏(1978-),男,广西省北海市人,硕士, 工程师,主要研究方向为电子对抗.

**唐济远**(1988-),男,昆明市人,硕士,工程师,主要研究方向为电子对抗.