

利用复杂调制 LFM 信号的 SAR 抗欺骗干扰技术

李江源 王建国

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 数字储频欺骗干扰是目前对合成孔径雷达(SAR)的一种有效干扰方式。该文提出利用脉间调频斜率抖动的复杂调制 LFM 信号,实现对数字储频欺骗干扰的抑制。由于雷达信号调制形式干扰方未知,降低了干扰信号和当前雷达发射脉冲信号之间的相关性。该文给出了在距离、多普勒二维域上的抗数字储频欺骗干扰处理方法,达到对数字储频欺骗干扰的有效抑制。

关键词: 合成孔径雷达; 欺骗干扰; 斜率抖动; 复杂调制

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2111-04

The Anti-Jamming Technology for SAR Cheat Jamming Using Complex Modulated LFM Signal

Li Jiang-yuan Wang Jian-guo

(College of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: The Digital Radio Frequency Memory Cheat Jamming (DRFMCJ) is an effective jamming method to SAR. This paper puts forward a method to generate the complex modulation LFM signal using the slope wobble in different Pulse Repetition Interval (PRI). Because the modulated form of the LFM signal in different PRI is not known to the jammer, which destroys the correlation of the jamming signal and the SAR transmitted signal in the current PRI. In this paper, the two dimension processing method to anti-jam on the range and doople fields is presented, which achieve the valid result to eliminate the digital radio frequency memory cheat jamming.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); Cheat jamming; Slope wobble; Complex modulation

1 引言

目前,常规单一的信号形式不能满足反侦察,抗干扰的需要,例如合成孔径雷达采用的线性调频信号,由于其信号形式固定,对其侦察、干扰技术已经趋于成熟,因此采用复杂调制信号是雷达信号发展的一个主要方向,复杂调制信号包括非线性频率调制信号、多项式相位调制信号、调频-调相信号等。复杂调制信号大多具有大时带积、抗侦察/干扰能力强等特征。由于复杂调制信号形式未知,干扰方对雷达信号建模的模型误差,导致信号参数估计不准确,进而造成干扰引导参数误差,所以复杂调制信号被干扰方利用率低。出于提高雷达抗干扰性能、增强雷达在干扰环境下工作稳健性考虑,带有复杂波形调制工作模式必将成为现代雷达发展重要方向,因此研究复杂调制雷达的抗干扰技术具有重要的意义。

对于 SAR 的干扰主要分为压制性干扰^[1-3]和欺骗干扰^[4-9]。欺骗干扰属于一种相参匹配干扰,欺骗性干扰模拟目标回波信号作用于雷达的目标检测和跟踪系统,以假代真或真假混杂,雷达往往在不知不觉中就受到了干扰,从而不能正确地检测真正的目标或者不能正确地测量其真正目

标的参数信息,因而有着特殊的干扰效果。其中假目标干扰就是在雷达观察空域内模拟一个实际上并不存在的目标来迷惑对方。

数字储频欺骗干扰^[5-7]是将接收雷达信号作数字储频,然后根据需要,对信号进行相应的延时、相位调制、复制叠加等变化方式再发射到欲干扰雷达。由于干扰信号与雷达回波信号相似,且在时频域上和雷达信号重合,同时具有较强的欺骗迷惑作用,因此雷达方对其干扰进行抑制较为困难。

本文采用发射脉间调频斜率随机抖动的 SAR 信号,实现对雷达信号的复杂调制。由于调制规律雷达方已知,而干扰方未知,因此造成干扰方存储的雷达前一个脉冲信号并调制发射的干扰信号与当前雷达发射信号之间的相关性降低,而雷达采用与当前脉冲相匹配的参考信号进行脉冲压缩,造成干扰信号与雷达参考信号的失配,从而降低干扰效果。在此基础上,本文给出了在距离、多普勒二维域上的抑制干扰处理方法。首先对干扰信号进行匹配消减,反变换后再进行目标回波信号压缩,实现了对数字储频欺骗干扰的有效抑制。

2 脉间斜率抖动 LFM 信号分析

设雷达第 n 个脉冲周期发射的斜率抖动 LFM 信号可表示如下:

$$p(t_n, \tau) = a_n(\tau) \exp[j\pi\beta\tau + j\pi(\alpha + \zeta_n)\tau^2] \quad (1)$$

其中 $a_n(\tau)$ 为信号的幅度, 通常情况下为常数, β 为载频, α 为调频斜率, ζ_n 为 LFM 信号调频斜率的抖动参数, 在不同的脉冲周期, 抖动参数是一组雷达已知的随机序列。在对原始的雷达发射信号进行相位调制时, 必须保证调制后信号带宽与原信号带宽部分重合, 因此斜率抖动参数 ζ_n 应选择原信号调频斜率的某一比例, 同时为了保证在不同脉冲发射周期所发射的斜率抖动 LFM 信号保持在相同的频率带宽内, 不同脉冲重复周期内的信号脉冲持续时间应随着 ζ_n 变化做适当改变。

雷达第 $n-1$ 个发射脉冲信号如下:

$$p(t_{n-1}, \tau) = a_{n-1}(\tau) \exp[j\pi\beta\tau + j\pi(\alpha + \zeta_{n-1})\tau^2] \quad (2)$$

假设干扰机从接收到第 $n-1$ 个脉冲信号开始, 数字储频并进行延时、相位调制、复制叠加等变换产生欺骗干扰信号, 和雷达第 n 个脉冲信号回波同时到达雷达天线端。

下面对干扰信号下变频后进行脉冲压缩分析(这里假设信号的幅度为常数并忽略)。

下变频后的干扰信号为

$$\hat{p}(t_{n-1}, \tau) = \exp[j\pi(\alpha + \zeta_{n-1})\tau^2] \quad (3)$$

雷达采用压缩的参考函数为

$$\hat{p}^*(t_n, -\tau) = \exp[-j\pi(\alpha + \zeta_n)\tau^2] \quad (4)$$

运用相位驻定原理可求得干扰信号的频谱函数:

$$\begin{aligned} \hat{P}(t_{n-1}, \omega) &= \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{n-1}}} \text{rect}\left(\frac{\omega}{\Delta\omega}\right) \exp\left[-j\left(\frac{\omega^2}{4\pi(\alpha + \zeta_{n-1})} - \frac{\pi}{4}\right)\right] \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{n-1}}} \text{rect}\left(\frac{\omega}{\Delta\omega}\right) \exp\left[-j\left(\frac{\omega^2}{4\pi\alpha} - \frac{\omega^2}{4\pi\alpha^2}\zeta_{n-1} - \frac{\pi}{4}\right)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中 $\Delta\omega$ 为调频信号带宽, 同样可以得到参考信号的频谱函数, 分析可得干扰信号脉冲压缩后相当于产生频域相位误差 $\phi(\omega)$:

$$\phi(\omega) = \frac{\omega^2}{4\pi\alpha^2}(\zeta_{n-1} - \zeta_n) \quad (6)$$

在信号通带边缘, 二次相位误差达到最大值:

$$\phi_{\max} = 4\phi\left(\frac{\Delta\omega}{2}\right) = \frac{\pi}{4}T^2(\zeta_{n-1} - \zeta_n) \quad (7)$$

式(7)中 T 为调频信号时宽, 于是

$$\phi(\omega) = 4\phi_{\max} \cdot \left(\frac{\omega}{\Delta\omega}\right) \quad (8)$$

经过脉冲压缩后输出信号 $S_{\text{out}}(\tau)$ 为

$$S_{\text{out}}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\Delta\omega}{2}}^{\frac{\Delta\omega}{2}} \exp\left[j4\phi_{\max} \cdot \left(\frac{\omega}{\Delta\omega}\right)^2\right] \exp(j\omega\tau) d\omega \quad (9)$$

忽略复系数后得到其包络 $E_{\text{nv}}[S_{\text{out}}(\tau)]$:

$$E_{\text{nv}}[S_{\text{out}}(\tau)] = |C(P) - C(Q) + jS(P) - jS(Q)|$$

$$P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\Delta\omega\tau}{2n} + n\right), \quad Q = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\Delta\omega\tau}{2n} - n\right), \quad n = \sqrt{2\phi_{\max}} \quad (10)$$

其中 $C(\cdot), S(\cdot)$ 为菲涅耳积分函数。

图1表示不同斜率抖动 LFM 干扰信号脉冲压缩结果。

从图1可见, 运用脉间斜率抖动的 LFM 信号可以破坏干扰信号与雷达参考信号之间的相关性, 造成脉冲压缩后主瓣展宽, 幅度下降, 峰值位置产生偏移。

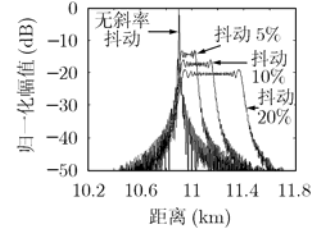


图1 斜率抖动 LFM 信号的匹配和非匹配压缩结果

3 斜率抖动 LFM 信号对数字储频欺骗干扰的抑制

下面在距离、多普勒二维域上, 研究利用斜率抖动 LFM 信号, 抑制数字储频欺骗干扰的处理方法。

令合成孔径雷达系统在第 n 个脉冲周期发射的信号为 $p(t_n, \tau)$, 假设干扰方采用数字储频干扰方式, 在第 n 个脉冲周期内干扰方发射的干扰信号为 $p(t_{n-1}, \tau)$ 的调制信号。则雷达接收系统在第 n 个脉冲发射周期接收到总的信号可表示如下:

$$s(t_n, \tau) = s_{\text{SAR}}(t_n, \tau) + s_{\text{JAM}}(t_n, \tau) \quad (11)$$

其中

$$s_{\text{SAR}}(t_n, \tau) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sigma_{i,j} p[t_n, \tau - a_{i,j}(t_n)] \quad (12)$$

式(12)为真实的面目标 ($M \times N$) 雷达回波信号, $\sigma_{i,j}$ 为第 i, j 个真实目标的散射系数, $a_{i,j}(t_n)$ 为第 i, j 个真实目标的时间延迟。

$$s_{\text{JAM}}(t_n, \tau) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L \tilde{\sigma}_{i,j} p[t_{n-1}, \tau - b_{i,j}(t_n)] \quad (13)$$

式(13)为干扰机发射的面目标 ($K \times L$) 欺骗干扰信号, $\tilde{\sigma}_{i,j}$ 为虚假目标的散射系数, $b_{i,j}(t_n)$ 为第 i, j 个虚假目标的时间延迟。

由改进的欺骗干扰^[7]得到

$$s_{\text{JAM}}(t_n, \tau) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L \tilde{\sigma}_{i,j} p(t_{n-1}, \tau - \tau_{i,j}) \varphi_{i,j}(t_n) \quad (14)$$

其中 $\tau_{i,j}, \varphi_{i,j}(t_n)$ 分别为第 i, j 个虚假目标的距离向延迟时间和方位向的调制相位。

由于干扰信号和发射信号的相关性变差, 可以采用雷达的发射信号来进行距离向匹配滤波从而降低干扰信号的影响, 脉冲压缩后的结果为(其中 $*$ 代表卷积):

$$\begin{aligned} s_1(t_n, \tau) &= s_{\text{SAR}}(t_n, \tau) * p^*(t_n, -\tau) \\ &= s_{\text{SAR}}(t_n, \tau) * p^*(t_n, -\tau) + s_{\text{JAM}}(t_n, \tau) * p^*(t_n, -\tau) \end{aligned} \quad (15)$$

由于干扰信号 $s_{\text{JAM}}(t_n, \tau)$ 由雷达发射的前一个脉冲 $p(t_{n-1}, \tau)$ 所构成, 因此用当前雷达发射脉冲的参考函数 $p^*(t_n, -\tau)$ 进行匹配滤波时, 在距离向上是不会聚焦的, 如上

节图 1 所示。但是由于雷达发射信号的前一个脉冲与当前脉冲并非完全不相关，匹配滤波的输出信号 $s_1(t_n, \tau)$ 中，仍然会有干扰残留信号影响。

为了达到较好抑制干扰效果，必须降低干扰信号残留项的影响。由于发射干扰信号形式雷达方已知，所以可以在处理雷达回波信号之前，对干扰信号进行匹配脉冲压缩，由于此时雷达信号是失配的，所以可以通过峰值检测方法，设置门限对干扰信号进行滤波。然后通过反压缩的方法，恢复雷达回波信号，再通过匹配脉冲压缩得到最终的去干扰结果。

首先用前一个发射信号的参考函数 $p^*(t_{n-1}, -\tau)$ 对回波信号进行匹配压缩，得到压缩后的结果：

$$s_2(t_n, \tau) = s(t_n, \tau) * p^*(t_{n-1}, -\tau) = s_{SAR}(t_n, \tau) * p^*(t_{n-1}, -\tau) + s_{JAM}(t_n, \tau) * p^*(t_{n-1}, -\tau) \quad (16)$$

包含目标信息的 $s_{SAR}(t_n, \tau)$ 是由当前雷达发射脉冲 $p(t_n, \tau)$ 构成，与前一个发射脉冲的参考函数 $p^*(t_{n-1}, -\tau)$ 进行匹配滤波后在距离向发生散焦，干扰信号经过匹配滤波后在距离向上产生聚焦，所产生的为假目标信息。可以通过峰值检测方法，设置门限对干扰信号进行滤波，滤波结果记为 $s_3(t_n, \tau)$ 。然后再对 $s_3(t_n, \tau)$ 进行反压缩，恢复得到干扰消减后的目标回波信号 $s_4(t_n, \tau)$ ：

$$s_4(t_n, \tau) = s_3(t_n, \tau) * p(t_{n-1}, \tau) \quad (17)$$

再用 $p^*(t_n, -\tau)$ 对 $s_4(t_n, \tau)$ 进行匹配压缩得到抑制干扰后的距离向压缩结果。

综合前面的分析，基于脉间斜率抖动的 LFM 信号对数字储频欺骗干扰抑制处理流程如下：

- (1) 在当前脉冲重复周期内，由 $s(t_n, \tau) * p^*(t_{n-1}, -\tau)$ ，得到 $s_2(t_n, \tau)$ ；
- (2) 对 $s_2(t_n, \tau)$ 信号进行峰值检测，设置门限对干扰信号进行滤波，得到 $s_3(t_n, \tau)$ ；
- (3) 对 $s_3(t_n, \tau)$ 进行反压缩，恢复得到干扰消减后的目标回波信号 $s_4(t_n, \tau)$ ；
- (4) 对 $s_4(t_n, \tau)$ 进行匹配压缩，得到干扰消减后的距离向脉冲压缩结果；
- (5) 对合成孔径时间内不同的脉冲回波，重复以上步骤，再对二维数据阵进行转置，方位压缩，得到最终的抑制干扰后的 SAR 图像。

4 仿真实验分析

为了验证利用脉间斜率抖动 LFM 信号进行数字储频式欺骗干扰的抑制效果，下面通过仿真试验加以验证。仿真参数设定：信号带宽：30MHz，脉冲宽度：10 μ s，平台高度：5000m，平台速度：100 m/s，采用正侧视条带式的工作模式。下面分别对单点目标和分布式目标数字储频欺骗干扰的抑制效果进行仿真分析。

4.1 点目标的欺骗干扰抑制

目标点的位置：方位向，距离向坐标(0,10000m)；欺骗

目标位置：方位向，距离向坐标(40m,10250m)。采用的斜率抖动大小为在斜率 10%左右随机扰动，干信比为 0dB。抑制单点目标欺骗干扰结果如图 2，图 3 所示。

图 2(a)，2(c)为采用常规 LFM 信号的点目标欺骗干扰。从图 2(b)，2(d)看出，直接对目标进行匹配压缩后，干扰信号距离压缩后主瓣展宽，幅度下降。二维压缩后在图像域上散开，不能形成欺骗干扰点目标。但是，干扰残留项的影响仍然比较明显。

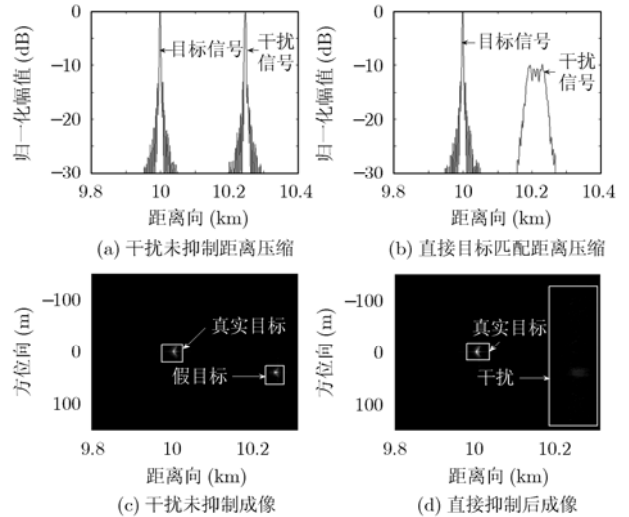


图 2 直接压缩抑制点目标欺骗干扰(干信比 0dB)

下面先对干扰信号进行匹配，在时域通过峰值搜索找到干扰信号位置，在峰值周围的 3dB 宽度内对干扰信号进行滤波，再反压缩得到干扰消减后的目标回波信号。结果如图 3 所示。

从图 3(a)看出，先对干扰信号进行匹配压缩后，干扰信号在距离向上能够聚焦，目标回波信号由于不匹配，造成主

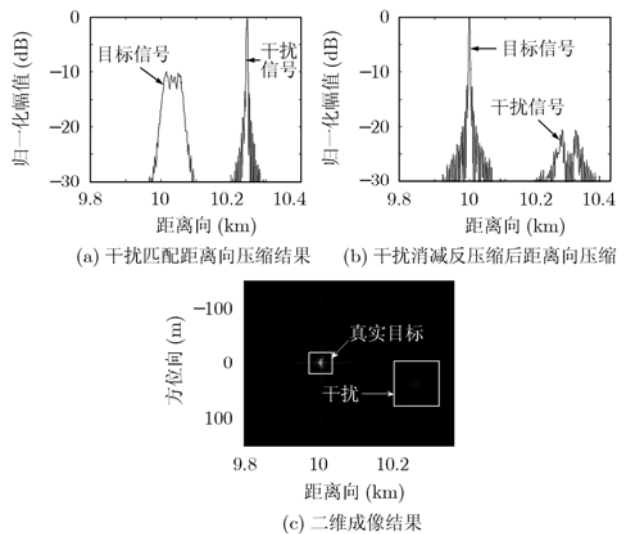


图 3 先消减干扰后压缩抑制点目标欺骗干扰(干信比 0dB)

瓣展宽,幅度降低。图3(b)为干扰消减反压缩后距离向压缩结果,对比图2(b),干扰信号残留项的幅度明显降低,图3(c)为二维成像结果,可见相对图2(d),干扰残留项的影响进一步降低了。

4.2 面目标欺骗干扰抑制

这里采用改进的欺骗干扰技术^[7]产生面目标的欺骗干扰,产生的假图像为坦克目标。雷达回波信号为模拟产生^[10,11],雷达回波信号和产生的干扰相加,通过RD算法进行成像处理。抑制干扰结果如图4。需要注意的是面目标欺骗干扰信号和雷达目标回波信号相互叠加,在这里采用逐次峰值搜索滤波方法,直到没有明显的峰值为止。

图4(b)为采用常规LFM信号的SAR欺骗干扰结果,干扰后在原始SAR图像上产生了虚假的坦克目标。图4(c)为用本文的方法抑制干扰后的结果,可见假目标被去除,只在图像上产生了部分干扰残留项的影响。由于面目标的干扰信号和目标信号混叠在一起,在滤波的同时对目标信号也会造成一定的损失,但是这种损失对目标图像的识别影响不大。

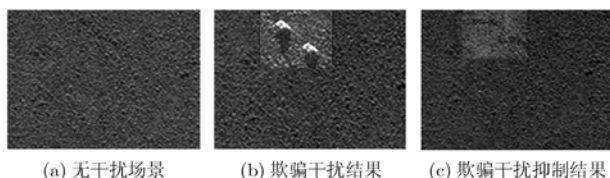


图4 抑制面目标欺骗干扰

5 结束语

通过上面理论分析和仿真实验,可得:基于脉间斜率抖动的LFM信号破坏了数字储频欺骗干扰信号和雷达脉冲压缩参考信号之间的相关性。直接用雷达回波信号的参考函数进行距离向的匹配压缩可以抑制干扰,但是干扰信号非匹配压缩的残留项仍然会对成像结果造成影响,尤其是如果干扰信号和目标信号在相近的距离单元内。所以先采用对干扰信号进行匹配,再通过峰值检测的方法,设置门限,通过滤波的方法消减干扰,再反压缩恢复雷达回波信号,可以进一步减少干扰残留项的影响。仿真实验验证了抑制方法的有效性和可行性。利用复杂调制的雷达信号抑制干扰对于雷达的系统设计具有重要的参考价值,本文只讨论了基于脉间斜率抖动的LFM信号,今后还需要进一步研究不同复杂调制类型的雷达信号,比如调频-调相信号、非线性频率调制信号、多项式相位调制信号等,为现代雷达的发展提供有益的参考。

参考文献

- [1] Li Neng-jing and Zhang Yi-ting. A survey of radar ECM and ECCM [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 1995, 31(3): 1110-1120.
- [2] Condlly C J. Some system considerations for electronic countermeasures to synthetic aperture radar [C]. IEE Colloquium on Electronic Warfare Systems, London, 14 Jan, 1991: 8/1-8/7.
- [3] Dumper K, Cooper P S, and Wons A F, et al. Spaceborne synthetic aperture radar and noise jamming [C]. Radar 97, Edinburgh, October, 1997: 411-414.
- [4] Pace P, Fouts D, Ekestorm S, and Karow C. Digital false-target image synthesizer for countering ISAR [J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 2002, 149(5): 248-257.
- [5] 孙云辉, 陈永光, 焦逊. 星载SAR应答式欺骗干扰研究[J]. 电子对抗技术, 2004, 19(2): 23-26.
Sun Yun-hui, Chen Yong-guang, and Jiao Xun. On study of the responsive deception for spaceborne SAR [J]. *ECM technology*, 2004, 19(2): 23-26.
- [6] 王盛利, 于立, 倪晋麟. 合成孔径雷达的有源欺骗干扰研究[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1900-1902.
Wang Shen-li, Yu Li, and Yi Ji-ling. A study on the active deception jamming to SAR [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12): 1900-1902.
- [7] 甘荣兵, 王建国. 改进的对星载SAR的应答式欺骗干扰[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(5): 614-617.
Gan Rong-bin and Wang Jian-guo. Improvement of the responsive deception for spaceborne SAR [J]. *Journal of the University of Electronic Science and Technology of China*, 2005, 34(5): 614-617.
- [8] 李江源, 王建国, 杨建宇. 基于数字储频式的对SAR类杂波干扰[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(6): 739-742.
Li Jiang-yuan, Wang Jian-guo, and Yang Jian-yu. The similar clutter's jamming to SAR based on digital frequency memorizer [J]. *Journal of the University of Electronic Science and Technology of China*, 2005, 34(6): 739-742.
- [9] 李江源, 王建国, 杨建宇. 基于参数引导的对宽带SAR的类杂波干扰[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(10): 1812-1816.
Li Jiang-yuan, Wang Jian-guo, and Yang Jian-yu. The similar clutter's jamming to wideband SAR based on leading of parameters [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(10): 1812-1816.
- [10] Franceschetti G and Lanari R. Synthetic Aperture Radar Processing [M]. New York: CRC, 1999: 125-231.
- [11] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, and Schirinzi G. SARAS: A SAR raw signal simulator [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(1): 110-123.

李江源: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、超宽带信号侦察与干扰技术、SAR图像检测和目标分类识别技术。
王建国: 男, 1954年生, 教授, 研究方向为合成孔径雷达系统和成像技术、目标识别和信息获取技术等。