

# 利用目标与杂波先验知识的机载雷达发射波形自适应生成方法

陈星波<sup>1</sup> 周加兵<sup>1</sup> 刘丁赞<sup>1</sup> 邱朝阳<sup>2</sup> 王刚<sup>3</sup> 饶妮妮<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学生物医学工程系, 成都, 610054; 2. 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所, 无锡, 214063; 3. 电子科技大学电子工程学院, 成都, 611731)

**摘要:** 发射波形自适应能够优化雷达在检测、跟踪和抗干扰等方面的能力,但其性能的好坏与雷达目标和杂波先验知识有很强的相关性。采用最大输出信杂噪比准则设计的雷达发射波形自适应方法已经在理论上被证实可行和有效。为了提升这类方法的实际应用价值,本文利用 Swerling 统计模型和数字高程模型(Digital elevation model, DEM)提供的目标和杂波先验信息,针对机载相控阵雷达,分析了基于最大输出信杂噪比(Signal-to-clutter-noise ratio, SCNR)准则的发射波形自适应方法性能和实用价值。仿真结果表明,这类发射波形能够自适应地随着目标和杂波的变化而改变,并实现二者的最优匹配,在提升雷达输出信杂噪比上优于传统发射波形,具有良好的实际应用前景。

**关键词:** 机载雷达;相控阵天线;发射波形;时域合成;数字波束形成

**中图分类号:** TN959.73; TN911.7 **文献标志码:** A

## Transmitted Waveform Adaptive Generation Method for Airborne Radar Utilizing Prior Knowledge of Target and Clutters

Chen Xingbo<sup>1</sup>, Zhou Jiabing<sup>1</sup>, Liu Dingyun<sup>1</sup>, Qiu Chaoyang<sup>2</sup>, Wang Gang<sup>3</sup>, Rao Nini<sup>1</sup>

(1. Biomedical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054, China; 2. Radar and Avionics Institute, Aviation Industry Corporation of China, Wuxi, 214063, China; 3. Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731, China)

**Abstract:** The adaptation of transmitted waveform can enhance radar performances in detection, track, anti-jamming, etc. But the performance of this technique is linked with the prior knowledge of the radar target and clutters. In theory, the adaptive method of transmitted waveform based on maximum output signal-to-clutter-noise ratio (SCNR) criterion has been proved to be feasible and effective. In this paper, for enhancing practical application value of this adaptive method, the performance of the transmitted waveform adaptation method was verified by utilizing the prior knowledge of targets and clutters provided by Swerling statistic model and the digital elevation model (DEM) in airborne phased array radar. The simulation results show that the transmitted waveform can adaptively vary with the change of target and clutter for achieving the optimal matching of the two. Therefore, this method is better than the traditional methods in increasing output SCNRs of radar. It has good practical application prospects.

**Key words:** airborne radar; phased array antenna; transmitting waveform; time-domain synthesis; digital beamforming

## 引 言

发射波形自适应技术可以极大地增强认知雷达对目标特性和外部环境的获取能力,优化雷达在检测、跟踪和抗干扰等方面的性能,也可以大大降低雷达信号被截获的可能性,使得敌方的电子侦察干扰更为困难,因此在有效提高雷达应对复杂战场环境适应力和生存力方面具有重要的理论和实际意义<sup>[1]</sup>。

早在 20 世纪 90 年代,国内外一些学者就开始了发射波形自适应的研究,随着认知雷达<sup>[2]</sup>的提出,发射波形自适应的理论研究取得了进一步的进展。发射波形自适应主要包括两方面的内容:(1)事先在数据库中存储大量发射波形,采用一定算法来自适应地选择最优波形以适应雷达所处环境;(2)根据雷达所处环境,实时、自适应地产生最优发射波形。对于波形数据库方案,国内外学者的主要研究方向是设计自适应选择算法来解决波形发射顺序<sup>[3-9]</sup>。相对于波形选择,自适应波形设计对雷达性能提升更大。例如,为了利用多个信息源实现在距离-多普勒单位频宽位置上最小化发射信号模糊函数平均值,文献[10]设计了一种唯相位调制波形,使得波形设计等同于在恒模条件的约束下,对一个实齐次四阶多项式的优化问题,并利用最大块改进(Maximum block improvement, MBI)方法,设计了一种多项式时间波形优化处理方案。文献[11]提出了一种在 CRR(Cognitive radar radio)网络中通信-雷达波形的联合设计方案,在实现更好的目标脉冲响应提取和更高的距离分辨率的同时能够保证短期内的高数据率。压缩感知是近几年的一个研究热点。文献[12]将该理论与认知雷达相结合形成了自适应压缩感知雷达(Adaptive compressed sensing radar, ACSR)概念。与传统雷达相比,ACSR 有更多的自由度,可以在不同目标响应中实现更小的互相关系数,与压缩感知雷达(Compressed sensing radar, CSR)相比,有更好的恢复性能。由于雷达通过接收机接收目标回波并进行信号处理后探测目标,所以雷达接收机的输出信杂噪比(Signal-to-clutter-noise ratio, SCNR)是反映雷达性能的一个重要指标。国内外学者围绕最大 SCNR 准则下最优雷达发射波形自适应设计开展了大量研究,包括:国内崔琛教授研究团队提出的基于遗传算法的认知稳健相位编码波形设计,色噪声下的认知雷达自适应检测波形设计以及 SCNR 准则下的认知 MIMO 雷达波形设计<sup>[13-15]</sup>;基于最大 SCNR 准则的波形优化算法和基于凸优化的波形设计算法<sup>[16-20]</sup>。基于最大 SCNR 准则的雷达发射波形自适应在理论上是可行和有效的,但进一步的实际工程应用还需要考虑更多真实环境因素的影响和降低理论算法的计算复杂度。本文利用目标与杂波先验知识分析了机载相控阵雷达发射波形自适应方法的性能,以提升其实际应用价值。

本文首先介绍了基于 Swerling 统计模型和数字高程模型(DEM)数据的先验目标和真实杂波信息提取方法,接着采用信号与系统理论分析了雷达接收机输出信杂噪比与其发射波形的关系,然后描述了基于最大输出信杂噪比准则的机载相控阵雷达最优发射波形自适应方法;最后,利用提取的目标与杂波先验信息,通过计算机仿真实验分析了上述方法的性能,并讨论了在能量和带宽不限定与限定的情况下发射波形的自适应优化能力。由于线性调频(Linear frequency modulation, LFM)是一种经典的雷达发射波形,在相控阵、高分辨以及合成孔径雷达中都得到了广泛的应用,而其他传统发射波形的设计方法存在参数设置上的影响问题,难以放在同样的参数条件下与本文方法进行比较,所以本文把 LFM 波形作为比较对象。

## 1 相关理论

### 1.1 目标与杂波的先验信息获取

#### 1.1.1 基于目标模型的先验信息

通常情形下,雷达截面积(Radar cross-section,RCS)作为目标的先验信息并不是一成不变的。目标的内在运动而造成的外形变化、姿态角变化以及雷达频率的改变等,都会导致目标的 RCS 产生一定的起伏变化。因此,需要采用统计方法来描述目标的 RCS,以提取到目标的先验信息。利用统计方法表示目标 RCS 的常用方法是 Peter Swerling 提出的 4 种 Swerling 统计模型<sup>[21]</sup>。其中,Swerling I&II 模型的 RCS 服从自由度为 2 的  $\sigma$  分布,其回波信号的幅度服从瑞利分布;Swerling III&IV 模型的雷达截面积服从自由度为 4 的  $\sigma$  分布,其回波信号的幅度服从莱斯分布。因此,基于 Swerling I&II 模型和 Swerling III&IV 模型可以获取较为准确的目标先验信息,用于设计与之自适应匹配的发射波形。

#### 1.1.2 基于 DEM 数据的真实杂波先验信息

数字高程模型(Digital elevation model, DEM)是一种实际地形高程信息的离散模型,主要描述地表地貌形态的空间分布。有别于传统地形图,DEM 将表征实际地形的地理信息以离散的数字形式按照一定的结构组织在一起。基于 DEM 的真实杂波模型是已经提出的一种实时杂波建模方法<sup>[22]</sup>。该方法通过对 DEM 数据进行分析 and 计算,提取出海拔、坡度、地面起伏和地表粗糙度等描述地貌类型的信息,然后根据提取的地形信息,对载机所处的地表地貌类型进行划分,并根据划分结果计算散射单元的后向散射系数和单元几何面积,接着利用后向散射系数和单元几何面积计算散射单元截面积  $\sigma$ ,最后根据式(1)计算杂波功率谱  $P_c(f)$ ,并将它作为杂波先验信息,即有

$$P_c(f) = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

式中: $P_t$  为雷达发射功率; $G_t = G_r = G$  为雷达收发共用天线增益; $\lambda$  为信号波长; $R$  为雷达天线与目标之间的距离。

### 1.2 最大输出信杂噪比准则下的最优发射自适应匹配波形

目标的检测与识别是机载雷达的主要任务之一,其本质是从雷达的回波信号中提取有用信息。有用信息的提取与目标和杂波模型的合理准确建模有着密切关系。雷达向空间发射电磁波,电磁波遇到物体产生反射以及散射效应,雷达通过接收环境反射和散射回到接收天线的电磁波来检测目标。在时域上,目标的散射特性通常能够用目标冲激响应函数来表示。当杂波存在时,雷达系统的信噪比指的是 SCNR,此时,机载雷达的发射-接收系统可用如图 1 所示的方框图表示。

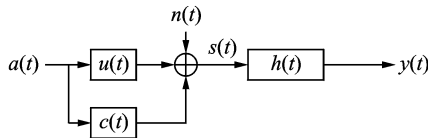


图 1 杂波环境下雷达发射-接收系统

Fig. 1 Radar transmitter-receiver system chart in clutter environment

图 1 中: $a(t)$  是雷达发射波形;能量为  $E$ ,  $u(t)$  是目标冲激响应函数; $n(t)$  是功率谱密度为  $\frac{N_0}{2}$  的高斯白噪声; $c(t)$  是功率谱密度为  $P_c(f)$  的杂波; $s(t)$  是混合了杂波与噪声的雷达目标回波信号; $y(t)$  是经过匹配滤波器  $h(t)$  滤波后的输出信号。根据信号与系统理论,经过滤波处理后,输出的目标回波信号为

$$y(t) = s(t) * h(t) = [a(t) * u(t) + a(t) * c(t) + n(t)] * h(t) \quad (2)$$

可知,  $t_0$  时刻的输出信杂噪比为

$$\text{SCNR} = \frac{|y_t(t_0)|^2}{E\{|y_n(t_0)|^2\}} = \frac{\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(f)U(f)H(f)e^{j2\pi f t_0} df \right|^2}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ P_c(f) |A(f)|^2 + \frac{N_0}{2} \right] |H(f)|^2 df} \quad (3)$$

式中  $y_t(t_0)$  和  $y_n(t_0)$  分别是信号和杂波/噪声的输出。利用 Cauchy-Schwarz 不等式, 令  $|G(f)|^2 = P_c(f) |A(f)|^2 + \frac{N_0}{2}$ , 式(2)可以简化为

$$\begin{aligned} \text{SCNR} &= \frac{\left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(f)G(f)G^{-1}(f)U(f)H(f)e^{j2\pi f t_0} df \right|^2}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(f)|^2 |H(f)|^2 df} \leq \\ &= \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(f)|^2 |H(f)|^2 df \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|A(f)|^2 |U(f)|^2}{|G(f)|^2} df}{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(f)|^2 |H(f)|^2 df} = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|A(f)|^2 |U(f)|^2}{|G(f)|^2} df \end{aligned} \quad (4)$$

当且仅当  $H(f)G(f) = \alpha [G^{-1}(f)A(f)U(f)e^{j2\pi f t_0}]^*$  ( $\alpha$  为常数) 时, 等号成立, 匹配滤波器的输出端信杂噪比达到最大, 即

$$\text{SCNR}_{\max} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|A(f)|^2 |U(f)|^2}{P_c(f) |A(f)|^2 + \frac{N_0}{2}} df \quad (5)$$

利用拉格朗日算法和极值求解方法, 可以求得使式(5)达到最大极值的发射波形能量谱为

$$|A(f)|^2 = \max \left[ 0, \frac{|U(f)| \sqrt{\frac{N_0}{\gamma}} - \frac{N_0}{2}}{P_c(f)} \right] \quad (6)$$

由式(5,6)可知, 当杂波存在时, 接收端的最大输出信杂噪比与雷达发射波形的能量谱、目标的冲激响应和杂波功率谱都有关系。若已知目标冲激响应与杂波功率谱, 可以通过改变发射波形来使接收端匹配滤波器的输出信杂噪比达到最大, 分别设计出与目标和杂波自适应匹配的最优发射波形。

在实际应用中, 雷达发射的是时域信号, 为了充分利用雷达发射机的效率, 雷达系统通常发射恒定包络的信号。因此, 还需要将最优发射波形能量谱转化为最优的恒模时域信号。为此, 采用非线性的时域波形合成算法<sup>[23]</sup>将式(6)表示的最优发射波形能量谱转化为时域信号  $a(n)$ ,  $n=1, 2, \dots, K-1$ 。其中  $K$  为发射波形的时间采样点数。

### 1.3 基于相控阵天线的发射波束形成

假设机载相控阵雷达发射天线是一个  $M$  行与  $N$  列的矩形平面阵, 阵元在行列之间等距放置, 间距  $d = \frac{\lambda}{2}$  (工作波长  $\lambda$  的一半), 列子阵和行子阵的加权值分别为  $L_m$  和  $L_n$  ( $m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N$ ), 如图 2 所示。又假设方位角记为  $\vartheta$ , 俯仰角记为  $\varphi$ , 锥角记为  $\psi$ , 主瓣指向为  $(\vartheta_0, \varphi_0)$ , 通过对每一个阵元的发射信号进行幅度加权和移相来实现波束形成, 则列子阵的发射天线方向图为

$$f(\varphi) = \sum_{m=1}^M L_m \exp\{j \frac{2\pi d}{\lambda} (m-1) (\sin\varphi - \sin\varphi_0)\} \quad (7)$$

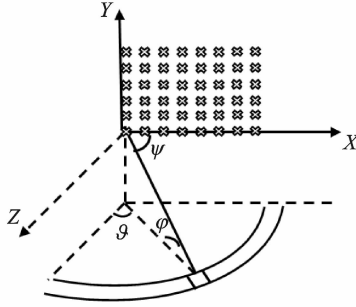


图2 平面阵列几何关系

Fig. 2 Geometrical relationships of planar array

行子阵的发射天线方向图为

$$f(\psi) = \sum_{n=1}^N L_n \exp\{j \frac{2\pi d}{\lambda} (n-1) (\cos\psi \cos\varphi - \cos\vartheta_0 \cos\varphi_0)\} = \sum_{n=1}^N L_n \exp\{j \frac{2\pi d}{\lambda} (n-1) (\cos\psi - \cos\psi_0)\} \quad (8)$$

平面阵总的发射天线方向图为

$$F(\psi, \varphi) = f(\psi) f(\varphi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M L_n L_m \exp\{j \frac{2\pi d}{\lambda} [(n-1)(\cos\psi - \cos\psi_0) + (m-1)(\sin\varphi - \sin\varphi_0)]\} \quad (9)$$

根据式(9),可以计算得到指向为 $(\vartheta_0, \varphi_0)$ 的平面阵各阵元的幅相加权值,记为 $G(\vartheta_0, \varphi_0)^{[24]}$ 。假设未进行幅相加权时的原始发射信号为 $y(n)$ ,则经过相控阵天线输出的发射信号为

$$a(n) = y(n)G(\vartheta_0, \varphi_0) \quad (10)$$

## 2 计算机仿真结果

### 2.1 与目标自适应匹配的最优发射波形仿真结果

令杂波功率谱 $P_c(f) = 1$ ,噪声为高斯白噪声,且功率谱密度为1。基于SwelingI&II和SwelingIII&IV两种目标模型分别仿真的匹配波形如图3和图4所示。图3(a)上半部分是SwelingI&II目标模型的冲激响应;图3(a)下半部分是基于目标冲激响应采用本文仿真的最优发射波形能量谱。对比图3(a)上下两部分可以看出,在目标能量分布较大的频率区域,本文方法产生的最优发射波形能量在该频率区域同样占有较大的比重,而且整个发射波形能量谱的走势基本与目标冲激响应在频域上的分布一致,这将有利于提升接收端的输出信杂噪比。图3(b)是对图3(a)下半部分发射波形能量谱进行时域合成后的信号能量谱。通过比较可以看出,合成的时域发射波形基本符合原始的最优发射波形能量谱,只是存在一些很小的偏差。与SwelingIII&IV目标模型匹配的最优发射波形仿真结果与基于SwelingI&II目标模型的结果类似(如图4所示),这里不再赘述。

为了得到最优发射波形对输出信杂噪比的改善情况以及合成时域发射波形后输出信杂噪比损失的量化结果,又基于两种目标模型进行了100次蒙特卡洛仿真实验,并将结果与传统LFM发射波形的结果进行了比较,如表1所示。对于SwelingI&II目标模型,本文设计的波形与传统LFM波形比较,其对应的输出信噪比提升了8.04 dB;在发射波形时域合成后,输出信杂噪比损失了0.59 dB,但依然比LFM发射波形的输出信杂噪比高出了7.45 dB。对于SwelingIII&IV目标模型,本文设计的波形相对于传

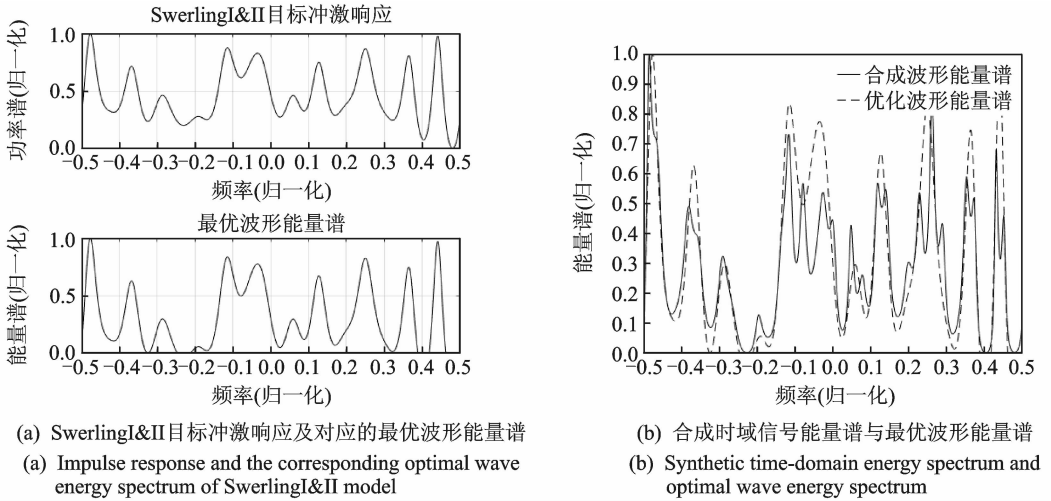


图 3 基于 Swerling I&amp;II 目标模型的最优匹配波形能量谱

Fig. 3 Optimal matching wave energy spectrum based on Swerling I&amp;II model

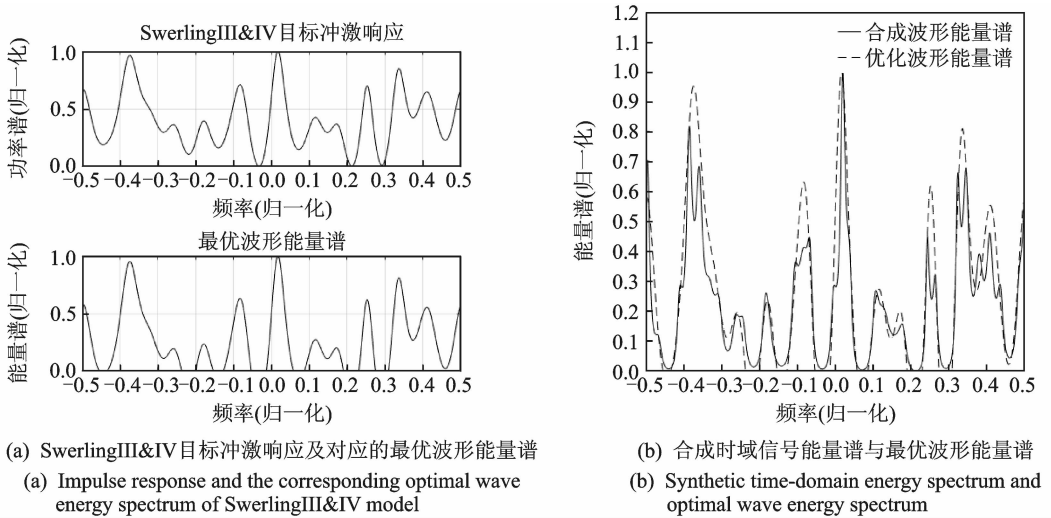


图 4 基于 Swerling III&amp;IV 目标模型的最优匹配波形能量谱

Fig. 4 Optimal matching wave energy spectrum based on Swerling III&amp;IV model

表 1 输出信噪比的改善与损失情况比较

Tab. 1 Comparisons of the improvement and loss of output SNRs

	发射波形	信杂噪比/dB
Swerling I&II 目标模型	最优匹配发射波形	-18.59
	时域合成波形	-19.18
Swerling III&IV 目标模型	最优匹配发射波形	-18.16
	时域合成波形	-18.74
	LFM 波形	-26.63

统的 LFM 发射波形,其对应的输出信杂噪比提升了 8.07 dB,在进行发射波形时域合成后,信杂噪比有 0.58 dB 的损失,但仍然比 LFM 发射波形的输出信杂噪比高出了 7.49 dB。

## 2.2 与杂波自适应匹配的最优发射波形仿真结果

令目标冲激响应  $|U(f)|=1$ 。从 DEM 数据中提取的一个距离环内的杂波功率谱如图 5 所示。

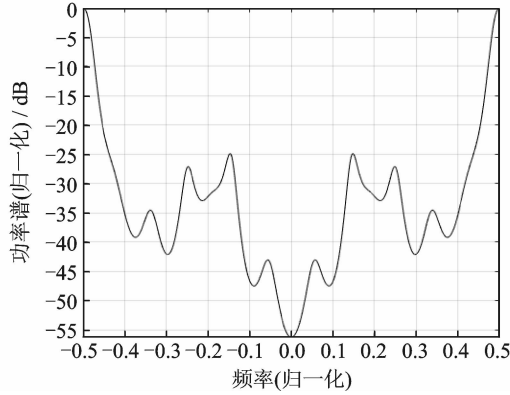


图 5 一个距离环内的杂波功率谱

Fig. 5 Clutter power spectrum in one range ring

仿真中,噪声设置为功率谱密度为 1 的高斯白噪声。又设机载相控阵雷达采用  $10 \times 10$  的平面相控阵天线,且对方阵的行列均采取了 20 dB 的切比雪夫加权来抑制旁瓣,天线主瓣指向的方位角和俯仰角分别为  $90^\circ$  和  $0^\circ$ 。发射频率为 3 GHz,发射信号能量为 1。在有能量限制且无频带限制的条件下,与图 5 杂波匹配的最优发射波形能量谱仿真结果及其与 LFM 波形的比较如图 6 所示。

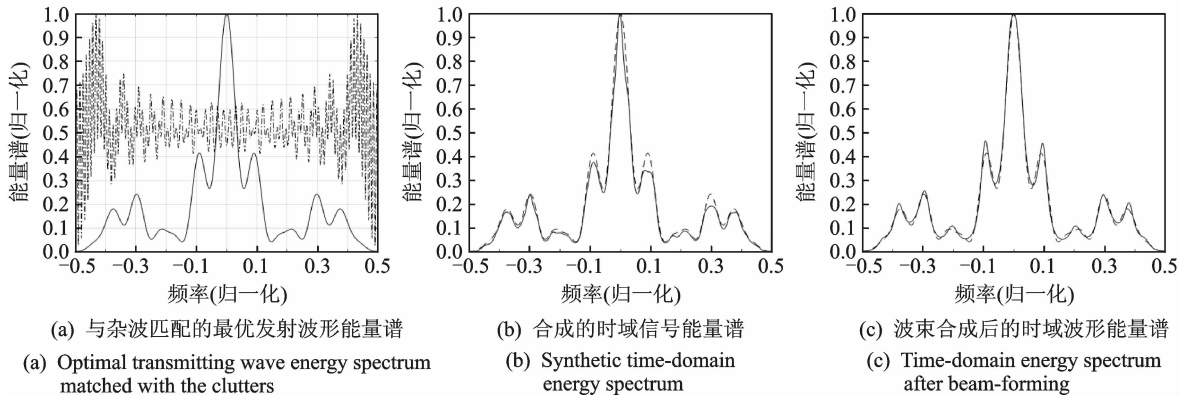


图 6 在能量限制且无频带限制条件下,与杂波匹配的最优发射波形能量谱仿真结果

Fig. 6 Simulation results on optimal transmitting wave energy spectrum matching the clutters under the condition of energy limitation and without band limitation

对比图 5 与图 6(a)中的实线图可以看出,最优发射波形在杂波功率低的频率区域分布的能量所占比重较大,而在杂波功率大的频段,其能量所占比重比较小,基本与杂波功率谱呈倒数关系。这种最优匹配的发射波形能量分布形式可以有效地提升输出信杂噪比。图 6(a)中虚线图代表 LFM 发射波形的能量谱,因为没有带宽的限制,其波形能量分布在整个频段内,且在各个频段上几乎相同。

图 6(b)中实线图是用图 6(a)合成的时域信号能量谱。其中,虚线图是最优发射波形能量谱。仿真结果表明,合成的时域信号幅值恒为 1,满足雷达发射信号的恒模约束条件,使得雷达发射机的效率可以被充分利用。从图 6(b)不难看出,虽然合成的信号能量谱相对于原始最优发射波形能量谱有一定的起伏,但是两者所占的频段以及幅度基本一致,可以认为本文采用的发射波形时域合成算法有一定的实际应用价值。

图 6(c)中实线图是经相控阵天线数字波束形成后得到的最优发射波形能量谱,虚线图是原始的最优发射波形能量谱。由于天线施加了切比雪夫窗加权,所以经过相控阵天线处理后的发射波形能量谱线的起伏更加平缓,与未经过天线处理的发射波形能量谱比较,一些微小起伏的毛刺基本被消除,而且发射波形形状更加接近原始的最优发射波形能量谱(图 6(c)中的虚线图)。

在实际应用中,带宽总是有限制的,因此,在上述仿真条件下,又加入了带宽限制条件。令带宽为归一化后接收机带宽的 1/3,图 7 是在能量带宽限制下的最优杂波匹配发射波形仿真结果及其与 LFM 的比较。

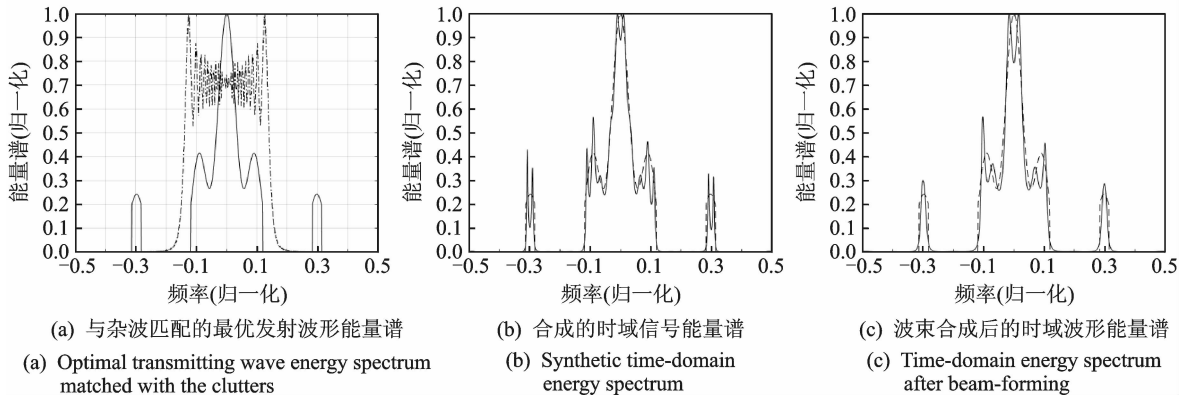


图 7 在能量频带限制条件下,与杂波匹配的最优发射波形能量谱图仿真结果与比较

Fig. 7 Simulation results on optimal transmitting wave energy spectrum matching the clutters under the condition of energy limitation and band limitation

对比图 4 与图 7(a)中的实线图可以看出,加入频带限制后,最优发射波形在杂波功率较低的频率区域分布的能量所占比重最大,且发射波形能量主要集中在低频区域,这是因为选择的杂波功率谱在低频区域能量较低。同时,还发现最优发射波形能量只集中在杂波功率分布最低的几个频段,这种发射波形能量的分布也可以有效地提升输出信杂噪比。

图 7(b)中实线图是用图 7(a)实线图合成的时域信号的能量谱,虚线图是最优发射波形能量谱。从中可以看出,虽然合成的信号能量谱相对于原始最优发射波形能量谱有一定的起伏,但是两者所占的频段以及幅度基本一致。图 7(c)中的实线图是经相控阵天线阵的数字波束形成后得到的发射波形能量谱,虚线图是最初的原始发射波形能量谱。与图 7(b)中未经过天线阵处理的原始时域信号相比,由于切比雪夫窗加权后对旁瓣具有抑制作用,所以经过天线阵处理后的发射波形能量谱线起伏更加平缓,一些剧烈起伏的毛刺基本被消除,发射波形形状更加接近原始的最优发射波形能量谱。

表 2 是在能量限制下,有无带宽限制时两种发射波形与 LFM 波形对应的接收机输出信杂噪比大小。与传统的 LFM 信号比较,在带宽不限的情况下,基于最大信噪比准则的最优杂波匹配发射波形算法的信杂噪比提升了 1.49 dB,而在经过发射波形时域合成后,信杂噪比损失也较大,达到了 7.61 dB。在带宽限制情况下,本文算法相比于传统 LFM 波形的输出信杂噪比略提升了 0.68 dB。



表 2 带宽不限与带宽限制下的杂波匹配波形性能比较

Tab. 2 Comparisons on performances of clutter matching waveform with and without band limitation

带宽条件	波形	信杂噪比/dB
带宽不限	LFM 信号	11.81
	最优杂波匹配波形	13.30
	时域合成后的波形	5.69
带宽限制	LFM 信号	12.07
	最优杂波匹配波形	12.75
	时域合成后的波形	5.53

### 3 结束语

本文利用 Swerling 目标模型和 DEM 杂波模型提供的先验信息,分析了采用最大输出信杂噪比准则设计的机载相控阵雷达发射波形自适应方法的性能。首先采用信号与系统理论分析了雷达接收机输出信杂噪比与其发射波形的关系,然后描述了基于最大输出信杂噪比准则的机载相控阵雷达最优发射波形自适应方法;最后,通过计算机仿真实验分析了上述方法的性能,并讨论了在能量和带宽不限与限定的情况下发射波形的自适应优化能力。仿真结果和理论分析表明,该方法可行和有效的,在雷达输出信杂噪比的提升上优于传统波形,在机载雷达中具有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 和洁,冯大政,孟超,等.机载雷达级联降维空时自适应杂波抑制方法[J].数据采集与处理,2015,30(2):417-423.  
He Jie, Feng Dazheng, Meng Chao, et al. Two-stage dimension-reduced space-time adaptive clutter suppression algorithm for airborne radar[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(2): 417-423.
- [2] Haykin S. Cognitive radar: A way of the future[J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 2006, 23(1): 30-40.
- [3] Romero R A, Goodman N A. Cognitive radar network: Cooperative adaptive beamsteering for integrated search-and-track application[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 915-931.
- [4] 李国万,索继东,柳晓鸣.基于门限体积最小准则的认知雷达波形选择方法研究[J].微型机与应用,2015,34(9):62-64.  
Li Guowan, Suo Jidong, Liu Xiaoming. Research on the selection method of cognitive radar waveforms based on the minimization of criterion gate volume[J]. Microcomputer & Its Applications, 2015, 34(9): 62-64.
- [5] 万海川,贺知明,宋腾飞.基于动态规划理论的改进型价值迭代算法[J].雷达科学与技术,2015,13(5):501-507.  
Wan Haichuan, He Zhiming, Song Tengfei. An improved value-iteration algorithm based on dynamic planning theory[J]. Radar Science and Technology, 2015, 13(5): 501-507.
- [6] 李万福.认知雷达理论及其波形选择算法研究[D].兰州:兰州大学,2015.  
Li Wanfu. Study on cognitive radar theory and waveform selection algorithm[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [7] Kilani M B, Nijssure Y, Gagnon G, et al. Cognitive waveform and receiver selection mechanism for multistatic radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(2): 417-425.
- [8] Zhang Zhenkai, Salous S, Zhu Jiehao, et al. A novel waveform selection method for cognitive radar during target tracking based on the wind driven optimization technique[C]// IET International Radar Conference 2015. Hangzhou, China: [s. n.], 2015: 1-8.
- [9] Nijssure Y, Kaddoum G, Leung H. Cognitive chaotic UWB-MIMO radar based on nonparametric Bayesian technique[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(3): 2360-2378.
- [10] Aubry A, Maio A D, Jiang Bo, et al. Ambiguity function shaping for cognitive radar via complex quartic optimization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(22): 5603-5619.
- [11] Nijssure Y, Chen Yifan, Boussakta S, et al. Novel system architecture and waveform design for cognitive radar radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(8): 3630-3642.
- [12] Zhang Jindong, Zhu Daiyin, Zhang Gong. Adaptive compressed sensing radar oriented toward cognitive detection in dynamic sparse target scene[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(4): 1718-1729.
- [13] 王鹏,崔琛,张鑫.基于遗传算法的认知雷达稳健相位编码波形设计[J].电子信息对抗技术,2013,28(3):27-31.

- Wang Peng, Cui Chen, Zhang Xin. Waveform design for cognitive radars robust phase code based on genetic algorithm[J]. *Electronic Warfare Technology*, 2013, 28(3): 27-31.
- [14] 王鹏, 崔琛, 张鑫. 色噪声下认知雷达自适应检测波形设计[J]. *电子信息对抗技术*, 2013, 28(5): 39-43.  
Wang Peng, Cui Chen, Zhang Xin. Adaptive waveform design for cognitive radar detection in colored noise[J]. *Electronic Warfare Technology*, 2013, 28(5): 39-43.
- [15] 张鑫, 崔琛. SNR 准则下的认知 MIMO 雷达波形设计[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(12): 128-131.  
Zhang Xin, Cui Chen. Cognitive MIMO radar waveform design based on SNR criterion[J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(12): 128-131.
- [16] 胡旭, 高阳, 贾鑫. 认知雷达中时域波形合成算法研究[J]. *航天电子对抗*, 2013, 29(4): 45-47.  
Hu Xu, Gao Yang, Jia Xin. Study on time-domain waveform synthesis algorithms in cognitive radar[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2013, 29(4): 45-47.
- [17] 胡旭, 贾鑫, 高阳. 基于最大信噪比准则的认知雷达波形优化算法[J]. *舰船电子对抗*, 2013, 36(3): 59-62.  
Hu Xu, Jia Xin, Gao Yang. Optimizing algorithm of cognitive radar waveform based on maximum SNR rule[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2013, 36(3): 59-62.
- [18] 魏轶旻, 孟华东, 毛滔, 等. 基于凸优化方法的认知雷达波形设计[J]. *现代雷达*, 2012, 34(3): 18-21.  
Wei Yimin, Meng Huadong, Mao Tao, et al. Radar phase-coded waveform design for extended target detection by convex optimization[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(3): 18-21.
- [19] 闫东, 张朝霞, 赵岩, 等. 基于信号杂波噪声比的认知雷达扩展目标探测波形设计[J]. *计算机应用*, 2015, 35(7): 2105-2108.  
Yan Dong, Zhang Zhaoxia, Zhao Yan, et al. Cognitive radar waveform design for extended target detection based on signal-to-clutter-and-noise ratio[J]. *Journal of Computer Applications*, 2015, 35(7): 2105-2108.
- [20] Aubry A, Maio A D, Piezzo M, et al. Cognitive radar waveform design for spectral coexistence in signal-dependent interference[C]//*IEEE Radar Conference*. New Jersey, USA: IEEE Press, 2014:1-4.
- [21] Swerling P. Probability of detection for fluctuating targets[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1960, 6(2): 269-308.
- [22] 饶妮妮, 陈星波, 周加兵, 等. 基于数字高程模型数据的机载认知雷达地杂波建模方法研究[J]. *电子科技大学学报*, 2016, 45(4): 511-519.  
Rao Nini, Chen Xingbo, Zhou Jiabing, et al. Research on ground clutter modeling of airborne cognitive radar based on digital elevation model data[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, 45(4): 511-519.
- [23] Jackson L, Kay S, Vankayalapati N, et al. Iterative method for nonlinear FM synthesis of radar signals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(2): 910-917.
- [24] 邱朝阳, 刘铭湖, 饶妮妮, 等. 辅助天线配置对自适应旁瓣对消系统性能的影响[J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(2): 123-128.  
Qiu Chaoyang, Liu Minghu, Rao Nini, et al. Effect of allocation of auxiliary antenna on performance of adaptive sidelobe canceller[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(2): 123-128.

## 作者简介:



陈星波(1990-),男,硕士研究生,研究方向:雷达信号处理, E-mail: 332401592@qq.com.



周加兵(1990-),男,硕士研究生,研究方向:雷达信号处理。



刘丁贇(1990-),男,博士研究生,研究方向:信号与处理。

邱朝阳(1963-),女,研究员,研究方向:机载雷达系统。



王刚(1977-),男,副教授,研究方向:信号与系统。



饶妮妮(1963-),通信作者,女,博士,博士生导师,研究方向:信号处理, E-mail: raonn@126.com.