

基于小孔径超视距目标探测的 OFDM-LFM 发射波形设计

贺青, 罗来源, 姚山峰

(盲信号处理重点实验室, 成都, 610041)

摘要 针对传统天波超视距雷达接收阵列孔径大的问题, 提出一种基于小孔径的超视距目标探测方法。分析了阵列孔径减小后信号接收与处理的性能损失, 在此基础上采用正交频分复用线性调频信号, 从发射信号设计方面提升系统性能。首先对信号进行建模, 重点提出一种基于凸优化的脉压信号峰值旁瓣抑制算法, 建立了优化模型并进行求解。仿真表明, 采用正交频分复用线性调频信号可以提升距离分辨率, 采用凸优化的算法后脉压峰值旁瓣为 -26.28 dB, 旁瓣电平平均值小于 -50 dB, 距离门内和距离门外噪声/干扰的抑制能力得到提升, 改善了小孔径超视距目标探测的处理性能。

关键词 小孔径圆阵; 正交频分复用线性调频信号; 峰值旁瓣抑制; 凸优化

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.05.014

中图分类号 TN911.4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)05-0056-05

OFDM-LFM Waveform Design of Over-the-Horizon Target Detection Based on Small Aperture Array

HE Qing, LUO Laiyuan, YAO Shanfeng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Blind Signals Processing, Chengdu 610041, China)

Abstract: The method of over-the-horizon detection based on the small aperture array is used to overcome the quite large aperture of the traditional OTHR. Since the performance of signal processing is depressed by using the small aperture array, this paper presents an orthogonal frequency division multiplexing linear frequency modulation (OFDM-LFM) waveform design method. With the aid of the signal model, the range resolution of the coherence-synthetic is analyzed. In order to suppress range side-lobe, the convex optimization is proposed. The simulation shows that OFDM-LFM signal can improve the performance of the range resolution. The peak side-lobe level is -26.28 dB and the average of pulse compression is less than -50 dB. According to the result, the capability of noise and interference cancelation are increased, and the target detection performance is improved too.

Key words: small aperture circular array; OFDM-LFM; peak side-lobe suppression; convex optimization

收稿日期: 2015-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61172140)

作者简介: 贺青 (1984-), 男, 四川成都人, 博士生, 主要从事雷达信号处理、阵列信号处理等研究. E-mail: kinghe919@163.com

引用格式: 贺青, 罗来源, 姚山峰. 基于小孔径超视距目标探测的 OFDM-LFM 发射波形设计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2015, 16(5): 56-60. HE Qing, LUO Laiyuan, YAO Shanfeng. OFDM-LFM Waveform Design of Over-the-Horizon Target Detection Based on Small Aperture Array[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(5): 56-60.

远距离目标探测一直是学者们研究的热门问题,天波超视距雷达(Over-the-Horizon Radar, OTHR)是一种远距离目标探测的有效手段,它工作在短波频段(3~30 MHz)利用电离层反射可以实现 1 000~4 000 km 的目标探测^[1]。天波超视距雷达的优势明显,具备大范围的目标探测、远程预警等能力。但是为了实现远距离的目标探测,天波超视距雷达设计都采用大的发射功率和 km 级的接收阵列^[2],部署受限。为此提出一种基于小孔径接收圆阵的超视距目标探测体制,圆阵列的直径在 400 m 以内,部署容易,利于推广。

采用小孔径圆阵代替传统天波超视距雷达的接收阵列必然会带来信号接收和处理上的性能损失。由于阵列孔径的减小直接导致波束形成中的主瓣宽度展宽、旁瓣升高、接收信号的信噪比下降^[3],这些问题都将影响系统最终的工作效能。波形设计是雷达设计中的重要研究内容,针对小孔径目标探测面临的问题,研究一种新型的雷达波形在一定程度上弥补性能损失,是有意义的研究方向。近年来,针对新型雷达波形设计有很多研究成果,一类是新型信号的研究包括正交频分复用信号^[4]、非线性调频信号^[5]和时间插排线性调频信号^[6]等。其中正交频分复用信号和非线性调频信号主要应用于 MIMO 雷达中,针对信号的正交性和脉压旁瓣抑制进行研究。时间插排线性调频信号应用到天波超视距雷达系统中,目的是抑制扩展多普勒杂波。另外一类是针对特定用途的波形设计,包括抑制特定区域的恒模波形设计^[7]、稳健波形设计^[8]以及基于优化方法的波形设计^[9]等。针对天波雷达波形设计研究相对较少,主要还是以澳大利亚 Frazer G.J 等人提出了时间插排线性调频信号研究为主,相似的在高频地波雷达波形设计中有学者提出了调频断续波信号^[10]以及随机跳频信号^[11]。这些研究主要是抑制脉压旁瓣,采用的主要方法是加窗函数。

为了弥补小孔径性能损失,研究一种新型的雷达信号是本文的研究目标。首先给出采用小孔径接收阵列后系统性能损失的分析,并提出新型信号应具备较好的距离分辨性能以及噪声/干扰的抑制性能。随后针对正交频分复用线性调频(Orthogonal Frequency Division Multiplexing Linear Frequency Modulation, OFDM-LFM)信号进行研究,分析了这种信号的模型。为了提升噪声/干扰抑制性能,针对 OFDM-LFM 信号提出一种基于凸优化的脉压旁瓣抑制算法,建立了算法模型并给出了算法流程,最后通过仿真验证了算法的有效性。

1 小孔径阵列性能损失分析

天线增益和方向图是天线设计时的重要参数,直接影响系统的接收性能。本节就从天线阵增益和方向图 2 个方面分析小孔径阵列的性能损失,进而得出波形设计的要求。

天线增益和天线定向性由下列公式表示^[12]:

$$G = kD \quad (1)$$

式中: G 为天线增益; k 为效率因子($0 \leq k \leq 1$); D 为天线的定向性。其中定向性的表达式如下:

$$D = 4\pi A_e / \lambda^2 \quad (2)$$

式中: λ 为电波的波长, A_e 为天线的有效面积,其定义为在天线最大辐射方向产生相同场强条件下,用均匀分布的天线孔径场代替原天线孔径场,均匀孔径场的孔径面积为天线的有效面积。式(1)和式(2)表明天线阵的增益和阵列孔径成正比,阵列孔径下降将导致阵列的信号接收增益下降。

阵列方向图反应了阵列接收信号的空域滤波能力,传统的天波超视距雷达一般采用线阵,小孔径接收阵列采用圆阵,下面分别给出 2 种阵列的方向图:

均匀线阵:

$$E(\varphi) = \frac{|\sin(N\beta/2)|}{|N\sin(\beta/2)|} \quad (3)$$

均匀圆阵:

$$E(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp\{j \frac{2\pi}{\lambda} [\sin\theta \cos(\varphi_i - \varphi) - \sin\theta_0 \cos(\varphi_i - \varphi_0)]\} \quad (4)$$

式(3)中 $\beta = (2\pi d \sin\varphi) / \lambda$, 其中 d 为天线单元的间距, φ 为来波的方位角, λ 为电波波长, N 为阵元数。式(4)中 θ 为来波仰角, (θ_0, φ_0) 为天线阵的扫描主波束方向, φ_i 为第 i 个天线单元相对于参考单元的方位角度。其余参数和式(3)相同。可以看出,方向图与阵列的部署情况密切相关,其主瓣宽度和旁瓣性能都随阵列孔径下降而恶化。

通过仿真给出说明,假设天波超视距雷达传统接收阵列为均匀线阵,阵列长度 2.5 km,阵元数 400。小孔径接收阵列为均匀圆阵,直径为 400 m,阵元数 80。工作频率为 6 MHz,来波仰角 10° , 2 个阵列都采用常规波束形成,其方向图见图 1。

从图中可以看出采用小孔径圆阵时阵列增益下降约 8 dB,主瓣展宽约 5 倍,旁瓣电平大幅升高。因此采用圆阵后阵列的分辨率、噪声/干扰的空域抑制能力、信噪比等信号接收性能将大幅下降,为此可以从波形设计和阵列设计 2 个方面进行改进。本文从波形设计角度出发设计一种新型的雷达波形,从

波形脉压的角度来看信号应具有较窄的主瓣,减小主瓣内噪声和干扰的影响;应具有较低的旁瓣,进一步抑制主瓣外的噪声和干扰的影响,使得这种信号可以适应更为恶劣的接收环境,改进小孔径接收阵列在空域处理上性能的不足。

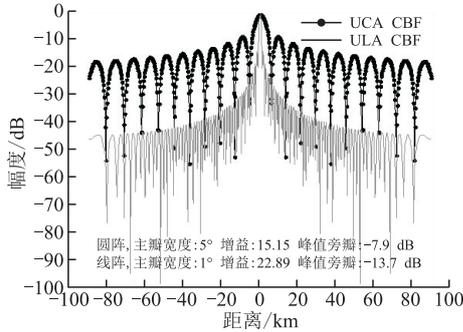


图1 均匀线阵和均匀圆阵波束形成图

Fig.1 The beamforming of the traditional linear array and the small aperture circular array

2 基于凸优化的 OFDM-LFM 信号脉压方法

2.1 OFDM-LFM 信号建模

正交频分复用线性调频雷达信号采用多个阵元天线发射相互正交的信号,在接收端通过匹配滤波完成信号处理。假设发射天线阵元数为 M , T 为脉冲宽度, B 为每一个阵元信号带宽, μ 为调频率 ($\mu = B/T$), f_z 为每个阵元信号间的频率间隔, F_c 为信号载频,则第 i 个阵元的发射信号为:

$$s_i(t) = u(t) \exp\left\{j2\pi\left[(F_c + (i-1)f_z)t + \frac{1}{2}\mu t^2\right]\right\},$$

$$i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式中: $u(t)$ 为信号复包络,为了满足阵元间信号的正交性,必须保证 $f_z \geq B$ [13]。下面给出 OFDM-LFM 信号的脉压处理原理。首先将每个阵元信号添加时延得到回波信号为:

$$x_i(t - \tau) = s_i(t - \tau) \quad (6)$$

上式中 τ 为回波时延。随后对每一个阵元信号采用式(5)作为参考进行匹配滤波并进行相参合成得到如下结果:

$$R(t, \tau) = \sum_{i=1}^M x_i(t - \tau) \otimes s_i(t) \quad (7)$$

文献[13]证明了对所有阵元信号进行相位补偿后采用相参合成可以使得带宽变为单个阵元信号带宽的 M 倍,相应的距离分辨率提升 M 倍。

2.2 基于凸优化的脉压旁瓣抑制方法

OFDM-LFM 信号采用相参合成以后距离分辨率提升,但是旁瓣依旧较高,可以采用参考信号加窗

函数的方法降低单个阵元信号的脉压旁瓣,但是这在正交信号中会破坏相位信息,造成脉压合成失败。为此本文提出一种基于凸优化的相参合成脉压信号的低旁瓣算法。首先将脉压合成后的结果写成向量形式:

$$\mathbf{R} = (r_1, r_2, \dots, r_N)^T \quad (8)$$

然后建立优化模型,寻找一组与长度 R 相等的权值 $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$,使得优化后的主瓣尽量窄,旁瓣尽量低,为了表征这个结果,设定目标函数为脉压输出的噪声功率最小,即:

$$\min_{\mathbf{w}} \|\mathbf{w}\| \quad (9)$$

下面求解条件函数,其中第 1 个条件函数考虑主瓣范围内的脉压输出是恒定的,不失一般性的可以表示为 1;第 2 个条件函数考虑峰值旁瓣电平小于一个期望的设定值,假设为 ϵ 。为了表示上述 2 个条件函数将 \mathbf{R} 构造成如下矩阵 [14]:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_N \\ 0 & \cdots & r_1 & r_2 & r_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_1 & \cdots & r_{N-1} & r_N & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{N \times (2N-1)} \quad (10)$$

假设脉压输出结果主瓣区域有 k 个点,则保留矩阵 \mathbf{L} 中中间一列和左右各 $k/2$ 列,从而构造矩阵 \mathbf{A} 表示脉压主瓣区域:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & r_1 & r_2 & \cdots & r_{k/2} \\ 0 & \cdots & r_1 & r_2 & r_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{N-k/2} & \cdots & r_{N-1} & r_N & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{N \times (k+1)} \quad (11)$$

则第 1 个限制条件为:

$$\mathbf{A}^H \mathbf{w} = 1 \quad (12)$$

由矩阵 \mathbf{L} 去掉 N 列以及其左右各 $k/2$ 列,得到矩阵 \mathbf{B} ,表示脉压旁瓣区域:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & r_{k/2+1} & \cdots & r_N \\ 0 & \cdots & r_1 & r_{k/2+2} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_1 & \cdots & r_{N-k/2} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{N \times (k+1)} \quad (13)$$

则第 2 个限定条件为:

$$\|\mathbf{B}^H \mathbf{w}\|_{\infty} \leq \epsilon \quad (14)$$

综合式(9)、(12)和(14)得到优化问题的模型见下式:

$$\min_{\mathbf{w}} \|\mathbf{w}\| \quad (15)$$

$$\text{subject to } \mathbf{A}^H \mathbf{w} = 1, \|\mathbf{B}^H \mathbf{w}\|_{\infty} \leq \epsilon$$

式(11)可以为一个凸优化问题,可以利用凸优化工具进行求解,得到优化的权值向量 \mathbf{w} ,即可求出最终的脉压优化结果:

$$\mathbf{R}_{\text{result}} = \mathbf{R}^H \mathbf{w} \quad (16)$$

3 算例

本节针对前文提出的算法进行仿真,主要分析优化后的脉压性能和对噪声/干扰的抑制能力。

仿真 1:分析优化后的 OFDM-LFM 信号脉压性能。仿真参数设定发射阵元 3 个,信号脉宽 10 ms,每个阵元信号带宽 10 kHz,正交频率偏移集为 [0 kHz 10 kHz 20 kHz],峰值旁瓣电平小于 -20 dB。采用频率脉压技术,得到结果见图 2。

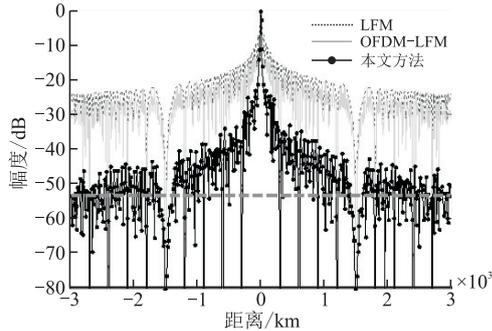


图 2 3 种信号脉压结果比较

Fig.2 The pulse compression result of three signals

从图中可以看出采用 OFDM-LFM 信号主瓣宽度下降,大约为单个 LFM 信号的 1/3。优化加权以后,主瓣和 OFDM-LFM 的主瓣宽度基本相同,旁瓣明显下降,其中峰值旁瓣为 -26.28 dB,OFDM-LFM 为 -13.27 dB,单个 LFM 信号为 -9.32 dB。图中的灰色虚线代表提出方法的脉压旁瓣均值(低于 -50 dB),它远小于另外 2 种信号的旁瓣均值。

仿真 2:分析优化后的 OFDM-LFM 信号抗噪声性能。设定回波信号的信噪比均为 -20 dB 其余仿真参数与仿真 1 相同,得到结果见图 3。

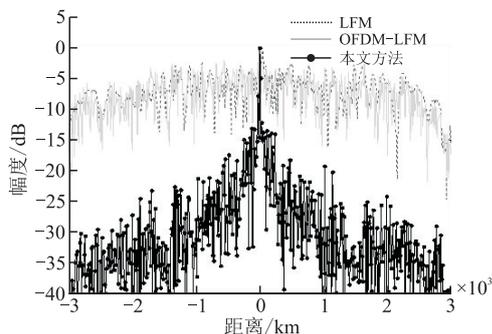


图 3 信噪比 -20 dB 时 3 种信号脉压结果比较

Fig.3 The pulse compression result of three signals with SNR -20 dB

从图 3 中可以看出当接收信号信噪比为 -20 dB 时 LFM 信号和 OFDM-LFM 信号都无法通过脉压进行有效的目标检测,而本文提出的算法仍然有 15 dB 左右的脉压输出信噪比,可有效检测出信号。

仿真 3:分析优化后的 OFDM-LFM 信号的抗干扰能力。设定真实目标距离雷达接收站 450 km (双程 900 km),干扰目标距离雷达接收站 900 km (双程 1 800 km),干扰信号回波功率高于目标 10 dB,其余仿真参数与仿真 1 相同,得到脉压结果见图 4。

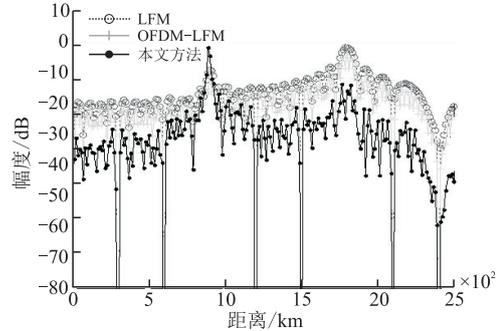


图 4 干扰存在时 3 种信号脉压结果比较

Fig.4 The pulse compression result of three signals in interference environment

图 4 说明当干扰存在时 LFM 信号和 OFDM-LFM 信号在干扰处(1 800 km)的脉压幅度均高于真实目标处(900 km)的脉压幅度值,目标检测将会出错。本文提出的方法在真实目标处峰值最大,仍然能够正确检测信号。

通过以上分析可知,基于凸优化的 OFDM-LFM 信号设计方法不仅具有较高的距离分辨率,同时峰值旁瓣低,可以很好地抑制噪声和干扰的影响。

4 结语

本文采用 OFDM-LFM 信号用于解决小孔径面临的性能差异问题,重点提出一种基于凸优化的旁瓣抑制算法,通过仿真可以看出算法是有效的。采用 OFDM-LFM 信号将传统大带宽的信号分解为多个小带宽的正交子信号,在短波频段干扰严重的条件下更容易进行频率选择;同时多个信号进行脉压相参合成降低了脉压的主瓣宽度,采用的优化方法降低了旁瓣电平,弥补了小孔径阵列在接收信号的性能损失,并提升了小孔径超视距目标探测系统的性能。

参考文献(References):

[1] Tang Xiaodong, Han Yunjie, Zhou Wenyu. Skywave Over-the-Horizon Backscatter Radar[C]//CIE International Conference on Radar.2001: 90-94.

[2] Thomason J F. Development of Over-the-Horizon Ra-

- dar in the United States [C]//IEEE Radar Conference.2003: 599-601.
- [3] He Qing, Luo Laiyuan. Analysis of Over-the-Horizon Target Detection Based on the Small Aperture Array [C]//International Congress on Image and Signal Processing. Dalian: IEEE Press, 2014: 1247-1251.
- [4] Sen S. OFDM Radar Space-Time Adaptive Processing by Exploiting Spatio-Temporal Sparsity [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(1): 118-130.
- [5] 赵伟, 赵永波, 李慧, 等. MIMO 雷达正交频分非线性调频波形设计 [J]. 电子学报, 2014, 42(11): 2331-2336.
ZHAO Wei, ZHAO Yongbo, LI Hui, et al. Orthogonal Frequency Division-Nonlinear Frequency Modulation Waveform Design for MIMO Radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(11): 2331-2336. (in Chinese)
- [6] Frazer G J. Mode-selective OTH Radar: Experimental Results for One-way Transmission via the Ionosphere [C]//IEEE Radar Conference. 2011: 397-402.
- [7] 李凤从, 赵宜楠, 乔晓林. 抑制特定区间距离旁瓣的恒模波形设计方法 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 532-536.
LI Fengcong, ZHAO Yinan, QIAO Xiaolin. Constant Modular Waveform Design Method for Suppressing Range Sidelobes in Specified Intervals [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 42(11): 2331-2336. (in Chinese)
- [8] 张向阳, 廖桂生, 许京伟, 等. 概率约束 MIMO 雷达稳健发射波形设计方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(1): 42-47.
ZHANG Xiangyang, LIAO Guisheng, XU Jingwei, et al. Design of Robust Transmit Waveform for MIMO Radars Based on Probabilistic Constraint [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(1): 42-47. (in Chinese)
- [9] Shannon D B, John J, Matthew C, et al. Polyphase-Coded FM(PCFM) Radar Waveforms, Part II: Optimization [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(3): 2230-2241.
- [10] 王磊. 高频地波雷达信号波形分析与设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
WANG Lei. Waveform Analysis and Design for High Frequency Ground Wave Radar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 王莹莹. 高频雷达复合调制波形设计与处理 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
WANG Yingying. Design and Processing of Hybrid Modulated HF Radar Waveform [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [12] John D K, Ronald J M. Antennas: For All Applications [M]. New York: McGraw-Hill Education (Asia) Co, 2002.
- [13] 彭尚, 王党卫, 贺照辉, 等. OFDM-MIMO 相控阵雷达带宽合成方法研究 [J]. 空军预警学院学报, 2015, 29(1): 1-6.
PENG Shang, WANG Dangwei, HE Zhaohui, et al. Method of Bandwidth Synthesis of OFDM-MIMO Phased Array Radar [J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2015, 29(1): 1-6. (in Chinese)
- [14] 何学辉. 基于凸优化的雷达波形设计及阵列方向图综合算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
HE Xuehui. Study on Radar Waveform Design and Array Pattern Synthesis Based on Convex Optimization [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)