

基于星载气象雷达的非线性调频信号优化设计

贾羽¹, 任鹏¹, 江柏森², 张振华²

(1 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580;

2 北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 随着天气观测、研究和规划的进展,气象雷达技术的开发工作取得了重大进展。脉冲压缩使新一代低成本、紧凑型星载天气雷达系统成为可能。为了抑制脉压带来的距离旁瓣,目标探测雷达通常采用基于幅度调制和失配滤波的方法,但由于其存在主瓣扩展和功率损失等缺点,不适用于气象观测。非线性调频(NLFM)信号可以调整其功率谱密度,在明显不降低信噪比的情况下提供较低的旁瓣输出。本文设计了一种新的波形优化框架。该框架通过多目标粒子群优化算法(MOPOS)构造了一种针对气象粒子目标的非线性调频(NLFM)脉冲压缩波形,实现了极低的距离旁瓣电平和较高的多普勒容忍,可以显著地缓解非常有限的卫星峰值功率的限制和卫星平台运动导致的多普勒对系统影响。仿真实验结果表明:改进的非线性调频波形具有良好的性能。

关键词: 气象雷达; 脉冲压缩; 非线性调频信号; 多目标粒子群优化

中图分类号: TN957.54; V443+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)06-0090-11

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230811001

引用格式: 贾羽,任鹏,江柏森,等.基于星载气象雷达的非线性调频信号优化设计[J].遥测遥控,2023,44(6):90-100.

Optimal design of nonlinear frequency modulation signal based on spaceborne weather radar

JIA Yu¹, REN Peng¹, JIANG Bosen², ZHANG Zhenhua²

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Advances in weather observation, research, and planning have led to significant progress in the development of weather radar technology. Pulse compression enables a new generation of low-cost, compact spaceborne weather radar systems. In order to suppress the range side lobes caused by pulse pressure, target detection radar usually uses methods based on amplitude modulation and mismatch filtering. However, due to its shortcomings such as main lobe expansion and power loss, it is not suitable for meteorological observations. Nonlinear Frequency Modulation (NLFM) signals can adjust the power spectral density to provide lower sidelobe output without significantly reducing the signal-to-noise ratio. In this paper, a new waveform optimization framework is designed. This framework constructs a nonlinear frequency modulation (NLFM) pulse compression waveform for meteorological particle targets through the multi-objective particle swarm optimization algorithm (MOPOS), achieving extremely low range side lobe levels and high Doppler tolerance. The very limited satellite peak power limitations and Doppler effects on the system caused by satellite platform motion can be significantly mitigated. The simulation experiment results show that the improved nonlinear FM waveform has good performance.

Keywords: Weather radar; Pulse Compression; Non-linear frequency modulation signal; Multi-objective particle swarm optimization

Citation: JIA Yu, REN Peng, JIANG Bosen, et al. Optimal design of nonlinear frequency modulation signal based on spaceborne weather radar [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 90-100.

引言

在气象雷达系统中,灵敏度和分辨率是两个重要的性能指标。灵敏度指的是最小可检测反射率,与脉冲宽度和峰值功率的乘积成反比^[1]。对于大多数气象应用而言,具有高功率的发射机通常难以获得或成本高昂。因此,必须传输更长的脉冲以获得足够的灵敏度。然而,距离分辨率与脉冲宽度成正比,因此较长的脉冲会导致分辨率下降。为了解决这个难题,脉冲压缩可以作为低峰值功率、长持续时间脉冲系统的补救措施,以实现精细的距离分辨率和更高的灵敏度^[1-3]。

脉冲压缩也存在一些问题。接收到的信号(脉冲压缩后)受到距离旁瓣(即与散射中心不一致的距离处的能量)的影响,这是有限时间带宽乘积的结果。具有大雷达截面(RCS)的散射体可能具有掩盖其他较弱目标的距离旁瓣(例如,掩盖近地气象回波的地表回波)^[4,5]。虽然这种污染也发生在短脉冲系统中,如云卫星云廓线雷达(CPR)^[6]和全球降水测量任务双频降水雷达^[7],但在脉冲压缩系统中,延长的脉冲宽度加剧了这种污染。

为了保证信噪比和有效降低旁瓣,非线性调频(NLFM)波形的概念在二十世纪六十年代初^[1]被提出,并在九十年代^[3,5]普遍使用。非线性频率调制(NLFM)信号基于相位驻留原理(POSP)^[7,8],可以改变时间-频率关系以塑造功率谱密度(PSD),并提供低旁瓣的匹配滤波输出而不损失信噪比(SNR)^[5-8]。这可以大大降低雷达系统的峰值功率,极大地降低了系统和发射成本。此外,与加权窗口相比,NLFM信号可以通过一些优化技术实现更好的波形性能^[9-11]。因此,NLFM信号是LFM信号的良好替代品,并引起了相当多的关注^[12-14]。在NLFM波形的产生和优化方面已经有了一些相当多的工作。文献^[15]提出了一种基于Bézier曲线的非线性调频波形优化方法。Saeedi和Faez^[16]使用广义分段线性(PWL)函数来定义对称瞬时频率函数,并应用多目标达到优化算法来优化波形。Jakobosky等人^[17]在CPM框架内利用边际Fisher信息设计了波形,它可以在不加宽主瓣的情况下减少旁瓣。Blant等人^[18]使用贪婪搜索方法,利用峰值旁瓣电平和综合旁瓣电平的互补度量来优化波形。Collins和Atkins^[19]提出了混合-NLFM,将NLFM和幅度窗口相结合,可以控制多普勒灵敏度。Doerry在San-

dia国家实验室的一份报告中重点讨论了脉冲内多普勒在雷达信号处理中的影响,并提出了一种补偿这种影响的方法^[20]。

本文提出了一种基于多目标粒子群优化算法(MOPOS)的气象粒子目标的非线性调频信号优化框架。基于此框架能够有效针对气象目标所需要的超低旁瓣和较高的多普勒容忍度进行优化,可以显著地缓解卫星功率的限制和卫星平台运动导致的多普勒对系统影响,同时由于发射非线性调频信号仅进行了幅度的微调,脉压后信噪比的损失控制在1 dB以内。通过该框架优化得到的几种非线性调频信号进行比较和评价,通过对脉冲压缩性能、背景噪声和多普勒效应的分析,验证了所优化后的非线性调频波形的优越性。

1 信号模型和系统

1.1 基于POSP信号模型

相位驻留技术允许使用信号PSD函数的预定义形状来实现适当信号波形的合成^[7]。在这一部分中,重新推导了基于POSP的NLFM波形的产生。基带雷达信号的解析形式可以表示为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(j\theta(t)) \quad (1)$$

其中, T 表示脉冲持续时间, t 表示快时间, $\theta(t)$ 表示描述信号调制的相位。 $s(t)$ 的瞬时频率与调制相位 $\theta(t)$ 的差值相关为

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2)$$

应当注意,频率 f 是时间 t 的函数。瞬时线性调频速率是瞬时频率 f 的差值

$$v(t) = \frac{df}{dt} = \frac{1}{2\pi} \cdot \theta''(t) \quad (3)$$

根据POSP,信号的功率谱密度与频率调制率的倒数有关。功率谱的幅度形状可以表示为

$$P(f) = \frac{C}{v(t)} = 2\pi \cdot \frac{C}{\theta''(t)} = C \cdot \frac{dt}{df} \quad (4)$$

其中, C 是一个常量。将 $t=Q(f)$ 表示为瞬时频率 f 的函数,(dt/df)可以表示为

$$\frac{dt}{df} = \frac{P(f)}{C} = Q'(f) \quad (5)$$

考虑脉冲持续时间为 T ,可以得到以下方程:

$$\frac{1}{C} \int_{-B/2}^{B/2} P(f) df = \int_{-B/2}^{B/2} Q'(f) df = T \quad (6)$$

其中, B 是发射脉冲的带宽。根据式(6),常数 C

应为:

$$C = \frac{1}{T} \int_{-B/2}^{B/2} P(f) df \quad (7)$$

从而可以同时满足波形的时长和带宽。因此, $Q(f)$ 可以推导为:

$$Q(f) = \int_0^f Q'(f) df = \int_0^f \frac{P(f)}{C} df \quad (8)$$

故 $f(t)$ 能够用 $Q(f)$ 的反函数表示, 即:

$$f(t) = Q^{-1}(f) \quad (9)$$

使用导出的 $f(t)$, 式(1)可以重写为:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left(j2\pi\left(\int_0^t f(\tau) d\tau\right)\right) \quad (10)$$

非线性调频波形的设计使 PSD 具有所需的加权函数形状。因此, 在产生波形之前, 应该选择加权函数。有许多权函数可用于获得具有低旁瓣的自相关函数^[8,11]。然而, 使用权函数的解析表达式来求解 $T(f)$ 的反函数通常是困难的^[15]。因此, 如果 $f(t)$ 的显式表达式很难得到, 则可以采用数值计算。在本轮文中采用多项式函数来计算 $f(t)$ 。

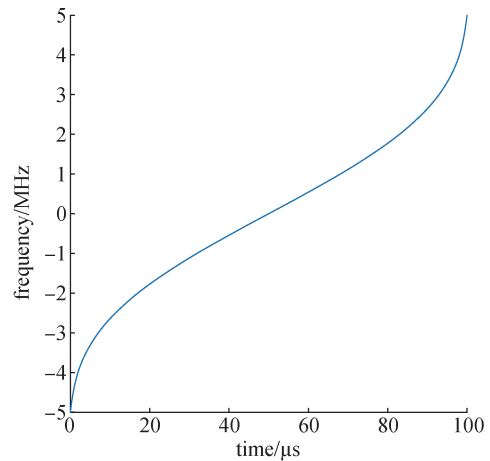
$$f(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_N t^N + R_N(t) \quad (11)$$

其中, N 是多项式阶数, $b_i (i=0, 1, 2, \dots, K)$ 表示多项式系数, $R_k(t)$ 表示余项。利用计算的 $f(t)$ 的多项式系数获得 NLFM 波形的相位项。如图 1 所示, 为一例 NLFM 信号的时频结构和脉压结果图。该非线性调频脉冲是采用 21 阶多项式汉明窗加权系数来构造的, 以获得具有 -48 dB 旁瓣的脉压输出。

NLFM 波形的设计旨在使 PSD 具有所需的加权函数 $P(F)$ 的形状。自相关函数 (ACF) 和功率谱密度是傅里叶变换对, 因此加权函数的选择决定了 NLFM 波形的性能特征。如图 2 所示, POSP 不同加权函数多普勒频移下主瓣宽度和旁瓣峰值对比, 可见 POSP 不同窗函数所设计的非线性调频信号所具有的特性也是不同的。

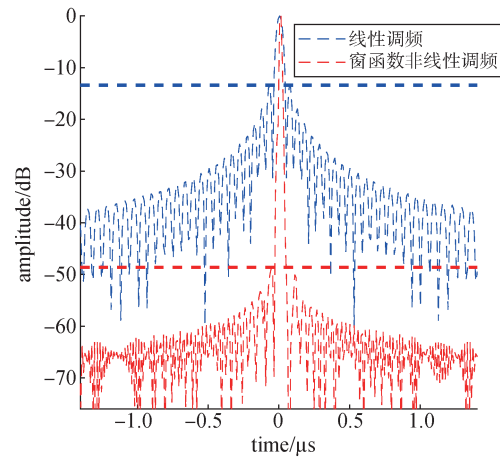
1.2 降水粒子雷达回波分析

为了分析降水粒子表面散射响应, 地杂波和海杂波的影响以及由于散射体和雷达之间的相对运动而产生的多普勒效应, 需要一个考虑粒子特性和表面特征的散射模型。选取了有代表性的表面 RCS 最坏情况模型, 对表面散射体的距离旁瓣性能进行了评估。同时考虑海、地面模型的准镜面特性, 为气象雷达观测引入海地杂波。通过对气象粒子和海地杂波的分析, 得到较为恶劣情况下的信杂比。



(a) 时频图

(a) Time frequency graph



(b) 脉压结果

(b) Pulse pressure result graph

图 1 非线性调频信号时频图和脉压结果图
Fig. 1 Time-frequency graph and pulse pressure result graph of nonlinear frequency modulation signal

1.2.1 降水粒子回波特性与等效反射因子

对于降水雷达, 用等效反射率作为系数来表征散射体的 RCS。等效反射率是雷达反射率的一种与频率无关的量度, 假定单位为均质单位雨量的瑞利散射, 单位为 mm^6/m^3 ^[21]。等效反射率因子是以 dBZ 为对数功率度量单位。星载降水雷达关注的数值范围从 -20 dBZ 到 60 dBZ。-20 dBZ 通常被认为是即使是最轻微的毛雨的较低标准值, 10 dBZ 通常与非常轻微的降水 (约 0.1 mm/h) 相关^[22]。

降水粒子在雷达回波中认为是体积目标, 所以需要将点目标雷达方程推广到体积目标^[11]。体积上的回波功率通过天线方向图和距离分辨率对降水粒子进行空间积分。对于发射机和接收机天线

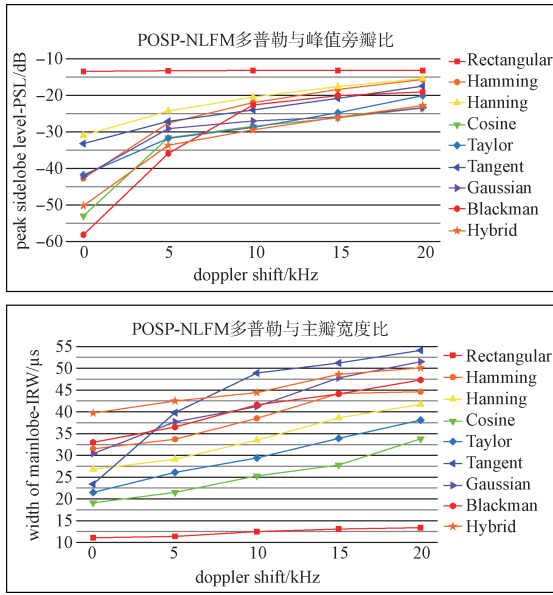


图2 POSP不同加权函数多普勒频移下主瓣宽度和旁瓣峰值对比

Fig. 2 Comparison of main lobe width and side lobe peak value under different weighting functions of POSP under Doppler frequency shift

距离 R 上的均匀分布的体积目标, 天线端口处的接收功率可以表示为

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2 G_r G_t}{(4\pi)^3 R^4 L^2} \left(\frac{h}{2} \frac{\pi \theta_1 \phi_1}{8 \ln 2} R^2 \right) \bar{\eta} \quad (13)$$

其中, $h = \tau c$ 是2倍的波束有效照射深度, P_t 是发射功率, P_r 是接收功率, $\bar{\eta}$ 是单位体积的平均RCS, G_r 和 G_t 是峰值天线增益, L 是系统损耗。窄波束天线的天线主瓣积分面积的近似表示为 $(\pi \theta_1 \phi_1) / (8 \ln 2)$, 其中 θ_1 是仰角向3 dB波束宽度, ϕ_1 是方位向3 dB波束宽度。平均RCS是雷达观察体积 V 中所有散射体RCS的归一化和, 计算如下

$$\bar{\eta} = \frac{\sum_n \sigma_n}{V} \quad (14)$$

单位为 m^2/m^3 。单位体积降雨的平均RCS(反射率)为

$$\bar{\eta} = \frac{\pi^5 |K_w|^2}{\lambda^4} \frac{\sum_n D_n^6}{V} \quad (15)$$

其中, D 为雨滴等体积直径, $|K_w|^2$ 为水的介电因子^[13]。雷达等效反射率因子由体积的平均RCS计算为

$$Z_e = \frac{\sum_n D_n^6}{V} 10^{18} = \frac{\lambda^4 10^{18}}{\pi^5 |K_w|^2} \bar{\eta} \quad (16)$$

Z_e 的单位为 mm^6/m^3 。对于降水粒子的雷达观测, 接收机滤波器的输出功率与观测体积的等效反射率因子有关。

$$P_o = \frac{\pi^3}{10^{18} 1.024 \ln 2} \frac{P_t G_t G_r \theta_1 \phi_1 h |K_w|^2}{\lambda^2 R^2 L^2} Z_e \quad (17)$$

其中, R 是探测距离, λ 是波长。在实际中, 雷达系统的大多数项都是常数, 因此, 等效反射率因子的方程简化为

$$Z_e = \frac{P_o R^2}{C} \quad (18)$$

其中, 气象雷达常数 C 为

$$C = \frac{G_{rx} P_t G_t^2 \pi^3 |K_w|^2 L^2 h \theta_1 \phi_1}{10^{18} \lambda^2 1.024 \ln 2} \quad (19)$$

1.2.2 气象回波信杂比

星载降水测量雷达在工作时, 向星下点发射探测信号, 并收集地表及不同高度的降雨粒子回波信号, 因此雷达回波中不仅有微弱的降水回波信号, 同时也有反射强烈的地表(或海表)回波。由于地表的雷达后向散射系数与雷达波束入射角有关, 在星下点处, 即雷达波束垂直指向地表时, 雷达回波最大。根据雷达方程可知, 地表回波功率为:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{L^2 (4\pi)^3 R^4} = \frac{P_t G_t G_r}{L^2 \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2} \frac{A \sigma^0}{4\pi R^2} \quad (20)$$

式中, σ 为地表反射系数, σ^0 为地表的单位后向散射系数, R 为雷达与地表距离, A 为雷达波束在地面投影面积。假设波束在地面投影为圆, 雷达波束投影面积 A 可以近似等效为:

$$A \approx \pi \left(\frac{\theta}{2} R \right)^2 \quad (21)$$

式中, θ 为雷达3 dB波束宽度。则上式可以改写为:

$$P_r = \frac{P_t G^2}{L^2 \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2} \frac{\theta^2 \sigma^0}{16} \quad (22)$$

即气象回波与地表杂波的信杂比为:

$$SCR = \frac{\pi^5}{4 \ln 2} \frac{h}{\lambda^4} |k|^2 Z \frac{1}{\sigma^0} \quad (23)$$

由上式可知, 气象回波的信杂比不仅与信号频率、雷达距离分辨率、系统灵敏度等雷达总体技术指标有关, 而且还与地表单位后向散射系数有关。地表单位后向散射系数是一个统计量, 与雷达波束入射角、海况条件、季节变化等因素有着密切的关系。一般认为Ka频段雷达的海面向

散射系数为 $\sigma^0 = 15 \text{ dB/m}^2$, 计算得到在小入射角下 SCR 大概为 55 dB。

在进行脉冲压缩时, 除了主瓣外还存在寄生的相关值, 即距离旁瓣。为了避免星下点处强烈的地表回波淹没邻近距离单元的微弱的气象回波信号, 要求脉冲压缩旁瓣必须足够低于-55 dB。

2 非线性调频信号的优化

在 NLFM 波形的设计中, 加权函数决定了 NLFM 波形的性能。此外, 性能优越的 NLFM 波形为优化提供了良好的初始解, 可以加速优化算法的收敛。对期望的 NLFM 波形有一些要求, 如旁瓣电平、距离分辨率、多普勒容限、信噪比损失等。因此, 波形设计是一个多目标优化问题 (MOOP), 在这些要求中, 气象目标场景距离旁瓣和多普勒容限占主导地位。由于问题的复杂性和非线性优化问题, 暴力搜索方案和基于梯度下降或内点算法的方法也都是无效的。因此, 本文中优化了多目标粒子群算法^[23,24]来解决问题。

2.1 优化参数选择

在优化时应当确定目标代价函数, 而脉冲响应通常使用以下衡量标准来确定其性能:

旁瓣-峰值电平比 (SPLR): 中频响应的第一个旁瓣的返回信号与主瓣峰值功率之比

$$SPLR = 10 \log \left(\frac{P_{\text{first sidelobe}}}{P_{\text{mainlobe}}} \right)$$

综合旁瓣电平比 (ISLR): 主瓣的返回能量与主瓣两侧旁瓣上的积分能量之间的比率

$$ISLR = 10 \log \left(\frac{P_{\text{integrated over sidelobes}}}{P_{\text{total main lobe power}}} \right)$$

脉冲响应宽度 (IRW): 脉冲响应主瓣的宽度, 比峰值低 3 dB。

对于气象目标, 通过利用表面散射模拟, 可以评估降水粒子需要几百米到 2 km 左右无杂波测量, 特别是星下点的杂波和海面回波的旁瓣足以干扰 250 m 高度的气象粒子。所以应当不光关注脉压后的峰值旁瓣, 同时也要关注距脉压中心 250 m 的旁瓣幅度和更远的甚至 2 km 的旁瓣幅度来保证整个气象粒子范围即对流层内杂波干扰较小, 实现可靠的信杂比^[25,26]。250 m 距离分辨率保证了与最先进的星载降水任务数据产品保持一致。所以提出新的衡量标准:

距离旁瓣-峰值电平比 (DSPLR): 响应的距离

M 旁瓣的返回信号与主瓣峰值功率之比

$$DSPLR_M = 10 \log \left(\frac{P_{\text{Distance M sidelobe}}}{P_{\text{Peak mainlobe}}} \right)$$

距离综合旁瓣电平比 (DISLR): 主瓣的返回能量与距主瓣 M 距离的旁瓣上的积分能量之间的比率:

$$DISLR_M = 10 \log \left(\frac{P_{\text{Integrated distance M sidelobes}}}{P_{\text{Total main lobe}}} \right)$$

2.2 多目标粒子群优化

在气象观测中除了旁瓣外, 还有其他客观标准, 如多普勒容差和距离分辨率等。仅简单地考虑单一目标会导致其他标准出现大幅度降低。在以前的研究中, 旁瓣峰值和主瓣宽度被组合在单个适应度函数中^[24]。在本文中通过引入多目标优化来明确地考虑 DISLR、多普勒容差, 从而可以直接在这些目标准则之间进行权衡。优化模型可表示为^[27]

$$\begin{cases} \min (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})) \\ \text{s.t. } \mathbf{x} \in X \end{cases} \quad (24)$$

其中, $f_i(\mathbf{x})$ 是第 i 个目标函数, \mathbf{x} 是 N 维实向量, X 是 N 维实空间。多目标优化问题 (MOOP) 中最重要的概念是帕累托最优解^[28]。如图 3 所示, 为帕累托最优曲线。一个可行解 $\mathbf{x}_1 \in X$ 称为帕累托支配另一个解 $\mathbf{x}_2 \in X$, 即

$$\begin{cases} f_i(\mathbf{x}_1) \leq f_i(\mathbf{x}_2) \text{ for all } i \in \{1, 2, \dots, k\} \\ f_j(\mathbf{x}_1) < f_j(\mathbf{x}_2) \text{ for at least one } j \in \{1, 2, \dots, k\} \end{cases} \quad (25)$$

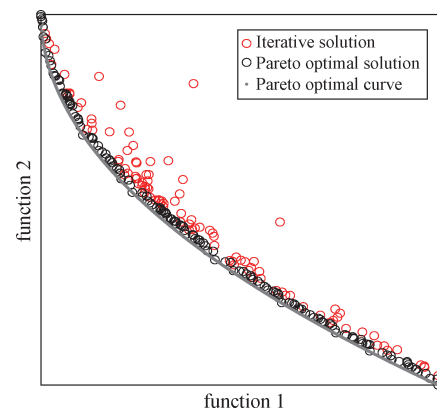


图3 帕累托最优曲线

Fig. 3 Pareto optimal curve

Coello 等人结合了 Pareto 占优思想与粒子群算法, 提出了多目标粒子群优化算法 (MOPSO)^[25]。该算法充分发挥了粒子群算法在多目标优化问题中的并行搜索作用, 同时在保证非劣解多样性的

基础上改善了算法的局部搜索能力,从而加快了算法的收敛速度。该算法将搜索过程中产生的非支配解保存下来,并从中选择全局最优位置来引导其他粒子在可行域中搜索。通过不断逼近保存的最优解, MOPSO算法实现了对 Pareto 最优前沿的收敛^[30]。MOPSO中粒子的速度和位置更新过程如下

$$\begin{cases} v_i(I+1) = wv_i(I) + c_1r_1(p_{\text{best}}(I) - x_i(I)) + \\ c_2r_2(g_{\text{best}}(I) - x_i(I)) \\ x_i(I+1) = x_i(I) + v_i(I+1) \end{cases} \quad (26)$$

式中, I 表示迭代次数, w 表示惯性权重, p_{best} 表示粒子的个体最优位置, g_{best} 表示当前整个种群的最优位置, c_1 和 c_2 ,是学习因子, r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 的随机数。

2.3 优化框架设计

如图4所示,为优化框架流程图。这一部分设计基于多目标粒子群优化框架来设计优化 NLFM 波形。为了提高非线性调频波形优化的速度,采用注定相位的方法得到的非线性相位参数,并将该参数设为粒子群初始参数。在引入初始值后会导导致粒子群算法的快速收敛,可能会使算法陷入局部最优,收敛到伪 Pareto 前沿。因此在多目标粒子群算法中引入变异算子^[29]。随着迭代次数的增加,粒子产生变异的概率降低,这样可以使粒子在算法初期具备高度探索性,定义变异概率

$$P_m = \left(1 - \frac{I}{I_{\text{Max}}}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (27)$$

其中 I 表示当前迭代数, I_{Max} 表示最大迭代数, k 表示变异率。当随机数小于 P_m 时,对更新速度和位置值的粒子 i 进行变异操作,变异后新的位置为变异区间 $[W_l, W_u]$ 中的随机值,如式(28)所示。其中 x_i 表示粒子 i 的位置, x_{varmax} , x_{varmin} 分别表示变量的上下界。

$$\begin{cases} W_l = \min(x_{\text{varmin}}, x_i - P_m(x_{\text{varmax}} - x_{\text{varmin}})) \\ W_u = \max(x_{\text{varmax}}, x_i + P_m(x_{\text{varmax}} - x_{\text{varmin}})) \end{cases} \quad (28)$$

同时,仅使用调频的情况下,很难获得尽可能低的旁瓣。因此,非常轻微的幅度调制是必要的。针对气象粒子的非线性调频信号多目标粒子群优化考虑距离旁瓣峰值电平、积分旁瓣这两个目标。优化目标模型可以写成:

$$\begin{cases} \min \{DISLR_M, Doppler_M\} \\ DSPLR_M \geq DSPLR_{M+} \\ \text{s.t. } a \in R^N \end{cases} \quad (29)$$

上式中, M 代表距离,当 $M=0$ 时, $DISLR_0$ 表示峰值旁瓣比、当 $M=250$ 时, $DISLR_{250\text{m}}$ 表示距离为250 m以内的综合旁瓣,当 M 足够大时可以认为 $DISLR_M$ 为积分旁瓣。

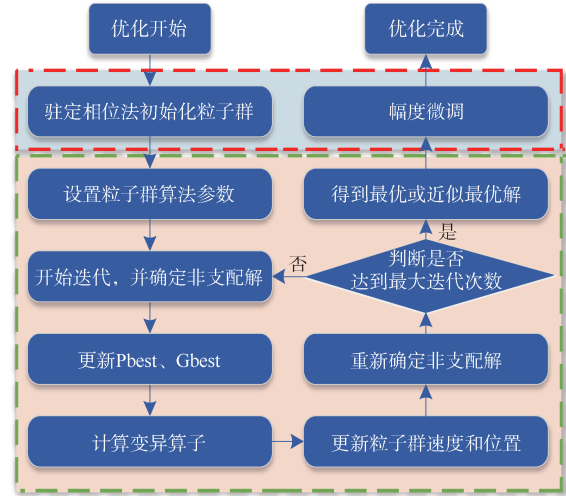


图4 优化框架流程图

Fig. 4 Optimization Framework Flowchart

优化框架的实现步骤如下:

- ① 根据 PSOP 生成初始化粒子的位置,随机设置初始粒子的速度。
- ② 根据目标函数计算初始粒子的适应度值,并设置粒子群参数
- ③ 开始迭代计算并确定非支配解,将非支配解保留并存储。
- ④ 确定并更新全局最优解 g_{best} 和个体最优解 P_{best} 。
- ⑤ 更新粒子的速度和位置信息,执行变异操作并对粒子的位置信息做进一步的更新。
- ⑥ 重新确定非支配解,更新存储。
- ⑦ 判断算法是否达到最大迭代次数,若满足终止条件。输出存储的非支配解,否则返回步骤③。
- ⑧ 进行幅度加权微调,优化完成

3 仿真和实验结果

为了评估 NLFM 波形的性能,在对其进行脉冲压缩处理后,需要分析旁瓣、多普勒容限等因素。优化框架中选用了两个目标,即 $DISLR$ 和多普勒容差。从以前的研究中可以知道,较大的多普勒频移会产生较高的旁瓣。因此,只需要考虑最大多普勒速度的最坏情况。通过计算卫星平台

移动和气象粒子运动导致的多普勒速度为 80 m/s, 该速度超过了绝大多数气象粒子的速度。多普勒频移记为 $f_D = 2v/\lambda$ 。以 $\lambda = 0.086$ m 的 Ka 波段为例, 计算出多普勒频移 $F_D = 20$ kHz。

如图 5 所示, 显示了具有 $DSPLR_{250}$ m 和多普

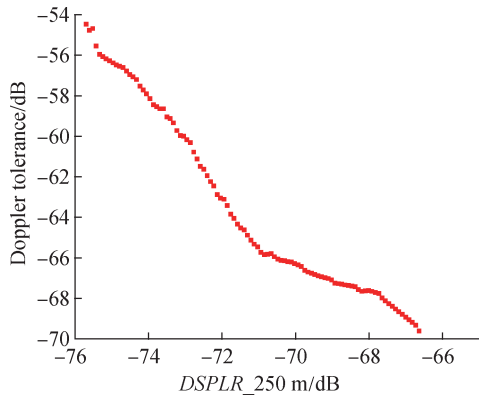


图 5 $DSPLR_{250}$ m 和多普勒容差的 Pareto 解
Fig. 5 Pareto solution of $DSPLR_{250}$ m and Doppler tolerance

勒容差等两个客观标准的帕累托解。其中参数为 $T = 100 \mu s$, $B = 10$ MHz, $F_s = 4$ B。水平轴表示没有多普勒频移的综合距离旁瓣, 而垂直轴表示具有多普勒频移 $F_D = 20$ kHz 的综合距离旁瓣。从图中可以看出, 如果想要一个没有多普勒频移的较低的旁瓣, 那么多普勒容差将变得更差, 反之亦然。基于图 5 所示的优化结果, 可以在没有多普勒频移的情况下实现的 $DSPLR$ 和可以接受的具有多普勒频移的旁瓣之间进行权衡。接受的最大多普勒频率所带来的旁瓣必须小于 -55 dB。其次, 考虑 $DISLR$ 分别在 0 m、250 m 和 1 km 的情况下通过多目标优化, 选择合理多普勒容限点后进行脉冲压缩。

如图 6 所示, 图 6(a) 为直接由 Hamming 窗生成的 NLFM 进行加权后脉压后旁瓣为 -42.1 dB, 图 6(b) 采用以 PSL 为单目标优化脉压结果, 其峰值旁瓣较低, 达到 -70.4 dB, 但在远距离的空间中旁瓣电平并没有进一步降低, 反而有较快的上升趋势, 这容易影响远距离的气象目标。图 6(c) 采用以

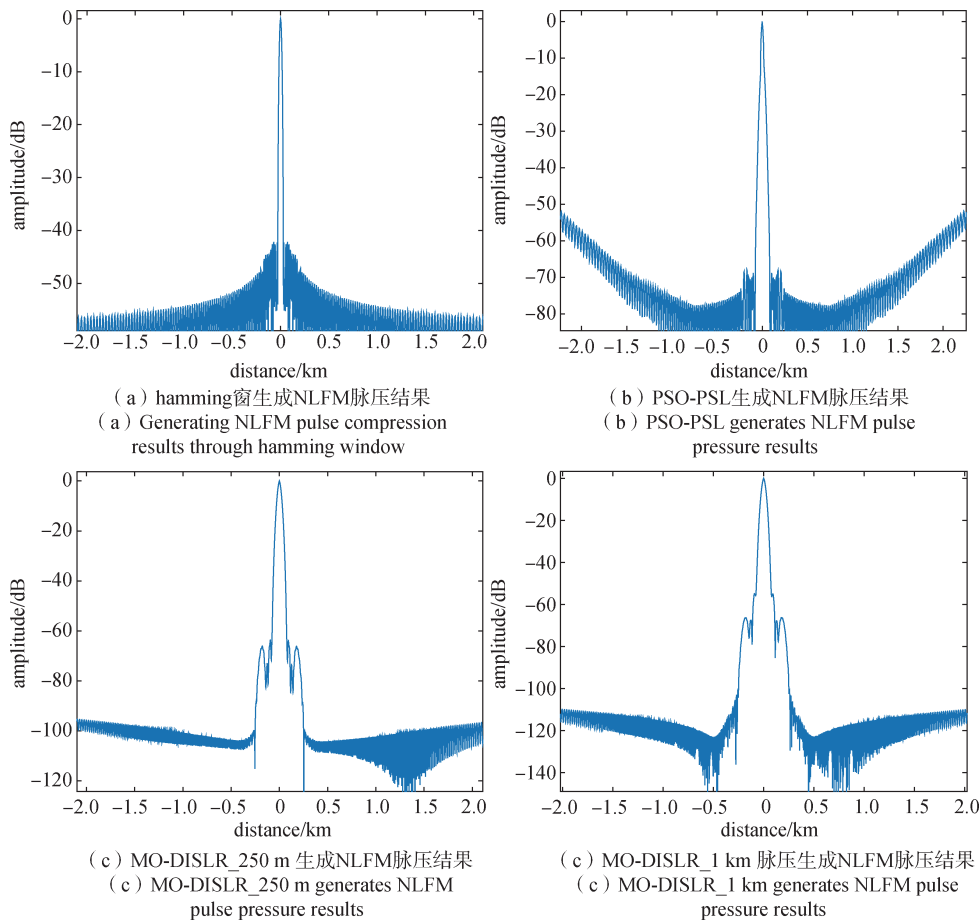


图 6 优化后脉压结果

Fig. 6 Pulse pressure results after optimization

DISLR_250 m为多目标优化的脉压结果，其峰值旁瓣较低达到-63.5 dB，并且旁瓣电平在250 m以内迅速降低到-100 dB左右，但是出现了主瓣拓展的现象，这会影响到探测降水粒子的距离精度。图6(d)采用以DISLR_1 km为多目标优化的脉压结果，其峰值旁瓣较低达到-57.2 dB，并且旁瓣电平在1 km以内迅速降低到-120 dB左右，但是远处的旁瓣电平有上升趋势，在2 km处回到-110 dB左右。

如图7所示，增加NLFM的优化次数，可以降低峰值旁瓣电平，提高雷达的分辨性能。但是优化次数增长到一定程度，这种优化带来的效果便会降低甚至趋近于没有效果。非线性调频的最大PSL可分别被抑制到-43.4 dB(POSP_Hamming)、-70.54 dB (PSO_PSL)、-66.86 dB (MO_PSL)，-62.54 dB (MO-DISLR_{250m})和-58.15 dB (MO-DISLR_{1km})。与其他NLFM相比，PSO_PSL单目标优化峰值旁瓣抑制PSL的能力最强。

通过背景噪声效应，分析了背景噪声对非线性调频脉冲压缩性能的影响。通常星载气象雷达的气象目标信噪比在-20~-10 dB，而地表强回波的信噪比在40~50 dB。所以对信噪比为-20~50 dB的复非线性调频信号加AWGN噪声进行仿真，并进行非相干累计500次左右，对峰值旁瓣电平和主瓣宽度进行了测量和分析。

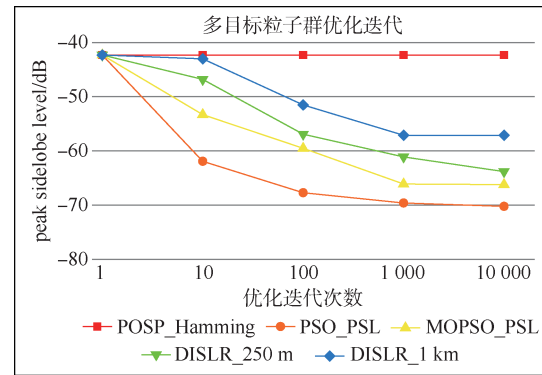
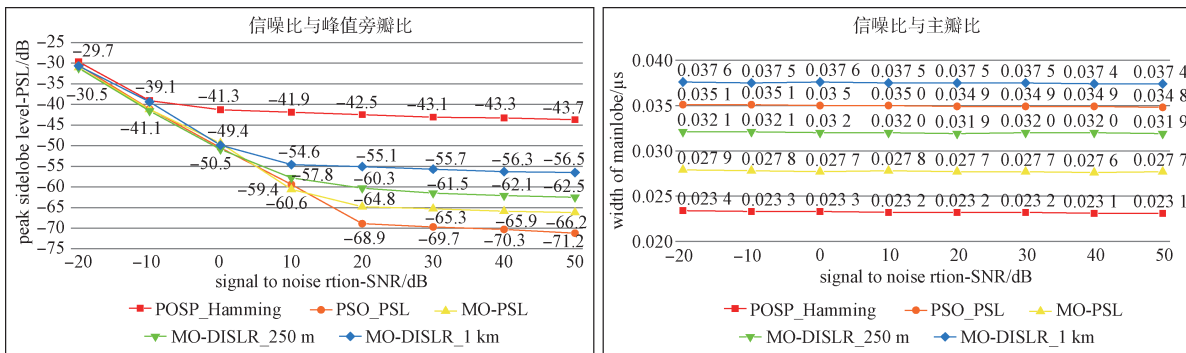


图7 多次迭代次数优化效果

Fig. 7 Multiple iterations optimization effect

随着信噪比的降低，峰值旁瓣电平增大。反之亦然，信噪比越高，峰值旁瓣电平(PSL)越小。如图8所示，为信噪比影响分析。从图8(a)可以看出，在信噪比为-20 dB时，几种优化目标的旁瓣都集中在-30 dB左右。这是由于信噪比较低导致的匹配滤波器不再具有良好的匹配性，引起输出旁瓣电平大幅度上升到低噪高度。当信噪比上升时POSP_Hamming首先进入稳定状态，峰值旁瓣为-42 dB左右。当信噪比达到50 dB时，PSO_PSL效果最好，峰值旁瓣为-70 dB左右。在MO-DISLR_{250m}优化中，当信噪比为50 dB时，峰值旁瓣电平约为-62.5 dB。从图8(b)可以看出，信噪比从-20 dB到50 dB的变化对主瓣宽度没有显著影响。



(a) 信噪比与峰值旁瓣比分析
(a) Signal-to-noise ratio and PSL analysis

(b) 信噪比与主瓣比分析
(b) Signal-to-noise ratio and IRW analysis

图8 信噪比影响分析

Fig. 8 Signal-to-noise ratio impact analysis

为了评估非线性调频波形的多普勒效应，需要分析距离旁瓣电平和主瓣功率等参数，影响多普勒效应的因素是目标或物体的速度对多普勒频率和时间膨胀的影响。在目标速度为0~80 m/s的情况下，比较了几种非线性调频波形在多普勒效

应下的特性。

如图9所示，为优化非线性调频信号多普勒特性。从图9(a)可以看出，多普勒效应的表现形式为大幅度升高旁瓣电平。受多普勒频率影响最大的是POSP_Hamming和PSO_PSL，而多目标优化后

的非线性调频信号受到影响普遍偏小。多普勒频移一旦超过 20 kHz, 多目标优化信号也出现旁瓣快速上升, 因为在优化时是按照最高 20 kHz 进行

优化的, 如果还需要更高的多普勒容限, 需要在优化时修改参数重新优化。从图 9(b)可以看出, 随着目标的速度增加, 主瓣峰值功率会降低。

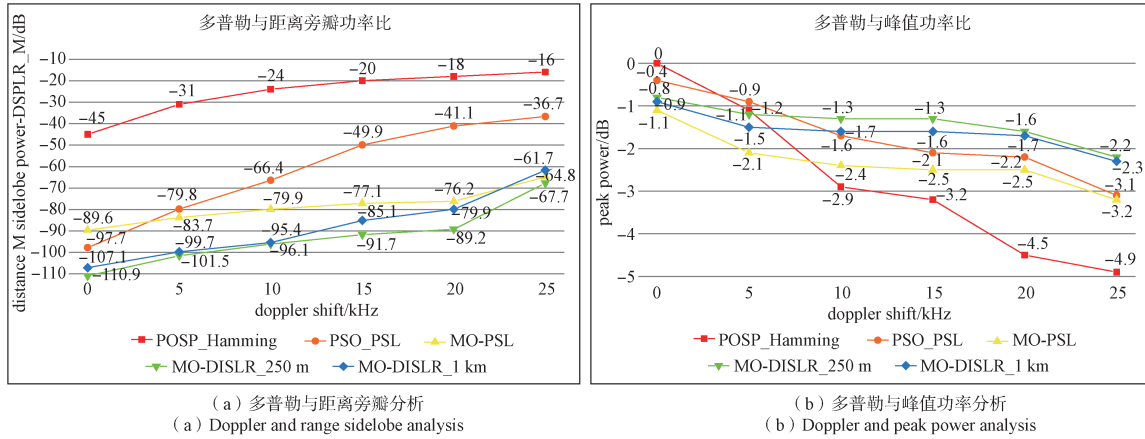


图 9 优化非线性调频信号多普勒特性

Fig. 9 Simulated meteorological echo pulse compression results

如图 10 所示, 为模拟气象和海杂波回波脉压结果。模拟了降水探测雷达在 407 km 处轨道运行

时回波情况。综合考虑选取了 MO-DISLR_{250m} 生成的非线性调频信号。雷达带宽为 10 MHz、脉宽为

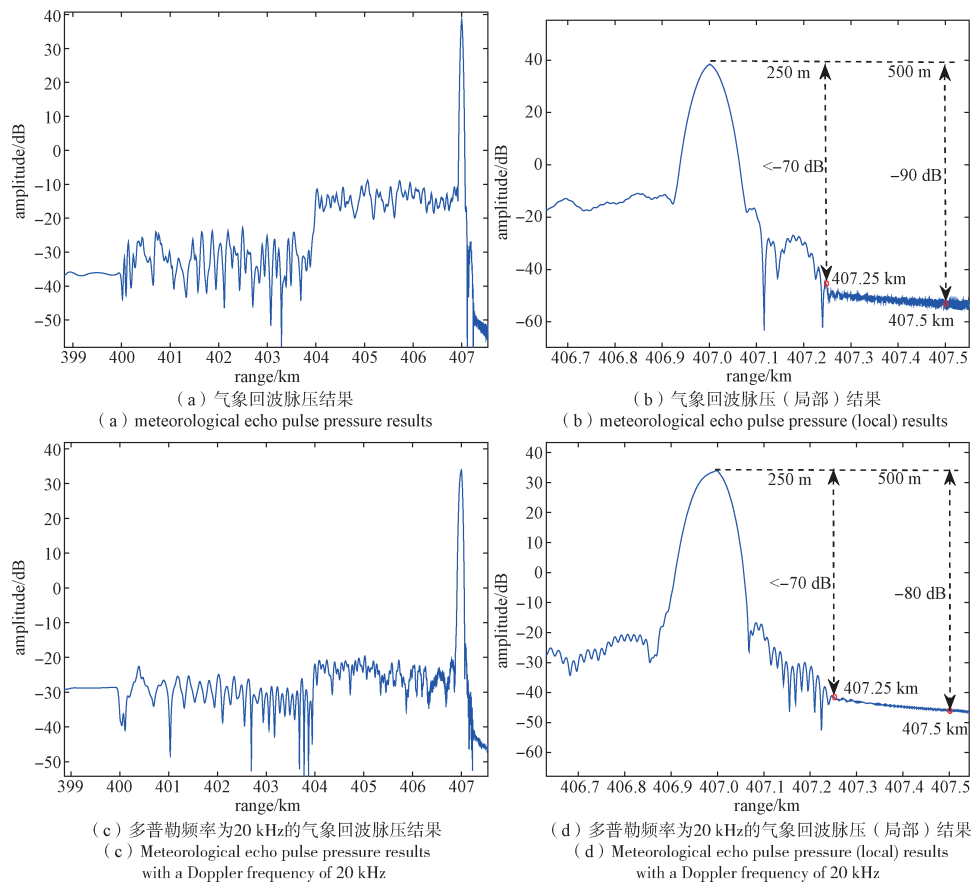


图 10 模拟气象回波脉压结果

Fig. 10 Simulated meteorological echo pulse compression results

100 μs 。从图10可以看出脉压后的能够有效探测最低100 m处的气象目标(比海平面回波功率低55 dB),不同高度的气象目标清晰可见。图10(b)、10(d)分别是图10(a)、10(c)的近地脉压结果放大图。可以看见出在250 m处的距离旁瓣被迅速抑制到小于-70 dB,在离地面500 m处的距离旁瓣被抑制到-90 dB,这足以精确地测量地表附近的最相关的降水过程。在引入20 kHz多普勒频移后,脉压结果出现小部分形变与拓宽,旁瓣的抬升并没有影响气象粒子的探测。低近距离旁瓣使近地表的降水探测成为可能,而远距离旁瓣抑制确保了对整个对流层的无杂波测量。10 MHz的非线性调频信号脉冲带宽和优化后带来的主瓣拓展等使距离分辨率达到120 m,然后将其平均到240 m,以提高灵敏度并与最先进的星载降水任务数据产品保持一致。

4 结束语

对降水的近地表观测对于了解全球降水过程至关重要。虽然星载降水测量雷达系统可能提供全球覆盖,但功率、重量和成本等因素限制了此类雷达系统的设计。本文提出了一种通过非线性调频信号的优化设计框架,使敏感度最大限度地接近表面。这样的设计优化可以提高对地观测云和降水雷达的任务效能。针对地面回波的距离旁瓣可能掩盖感兴趣的目标的降水和云的最低点观测,建立了降水粒子特性和地面散射的模型。同时考虑了平台相对于表面的运动、气象粒子的运动等,对多普勒频移容限提出了要求。在本文中,采用相位驻留法,但这只是优化的一个初始量。由于优化问题的复杂性,采用了多目标粒子群优化算法。根据计算,在距离旁瓣和多普勒容差条件下,多目标综合旁瓣250 m优化目标是较好的选择。从多目标优化的结果可以看出,PSL、多普勒容差和距离分辨率等要求是耦合在一起的,不能同时优化,这意味着必须在实际应用中对这些要求进行权衡。

参考文献

- [1] BATTAGLIA A, KOLLIAS P, DHILLON R, et al. Spaceborne cloud and precipitation radars: Status, challenges, and ways forward[J]. *Reviews of Geophysics*, 2020, 58(3): e2019RG000686.
- [2] ZHOU K, QUAN S, LI D, et al. Waveform and filter joint design method for pulse compression sidelobe reduction[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 1-15.
- [3] AUSTIN G L. Pulse compression systems for use with meteorological radars[J]. *Radio Science*, 1974, 9(1): 29-33.
- [4] 尹红刚. 星载降水雷达技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2008.
- [5] HARRIS F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1978, 66(1): 51-83.
- [6] KURDZO J M, CHEONG B L, PALMER R D, et al. A pulse compression waveform for improved-sensitivity weather radar observations[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(12): 2713-2731.
- [7] COOK C E. A class of nonlinear FM pulse compression signals[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1964, 52(11): 1369-1371.
- [8] BUDA R. Stationary phase approximations of FM spectra[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1966, 12(3): 305-311.
- [9] GHAVAMIRAD R, BABASHAH H, SEBT M A. Nonlinear FM waveform design to reduction of sidelobe level in autocorrelation function[C]//*IEEE 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2017: 1973-1977.
- [10] XIE Q, ZENG H, MO Z, et al. A two-step optimization framework for low sidelobe NLFM waveform using Fourier series[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.
- [11] O'HORA F, BECH J. Improving weather radar observations using pulse-compression techniques[J]. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 2007, 14(4): 389-401.
- [12] BEAUCHAMP R M, TANELLI S, SY O O. Observations and design considerations for spaceborne pulse compression weather radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 59(6): 4535-4546.
- [13] BEAUCHAMP R M, TANELLI S, PERAL E, et al. Pulse compression waveform and filter optimization for spaceborne cloud and precipitation radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 55(2): 915-931.
- [14] FRANZIN A, STÜTZLE T. Revisiting simulated annealing: A component-based analysis[J]. *Computers &*

- Operations Research, 2019, 104: 191-206.
- [15] KURDZO J M, CHEONG B L, PALMER R D, et al. Optimized NLFM pulse compression waveforms for high-sensitivity radar observations[C]//IEEE 2014 International Radar Conference. 2014: 1-6.
- [16] SAEEDI J, FAEZ K. Synthetic aperture radar imaging using nonlinear frequency modulation signal[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(1): 99-110.
- [17] JAKABOSKY J, ANGLIN P, COOK M R, et al. Non-linear FM waveform design using marginal Fisher's information within the CPM framework[C]//2011 IEEE RadarCon (RADAR), 2011: 513-518.
- [18] JAKABOSKY J, BLUNT S D, HIGGINS T. Ultra-low sidelobe waveform design via spectral shaping and LINC transmit architecture[C]//2015 IEEE Radar Conference (RadarCon), 2015: 1021-1026.
- [19] COLLINS T, ATKINS P. Nonlinear frequency modulation chirps for active sonar[J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 1999, 146(6): 312-316.
- [20] DOERRY A W. Generating nonlinear FM chirp waveforms for radar[R]. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2006.
- [21] 马少伟, 双波段雷达的降水反演[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- [22] 张振仟, 胡明宝, 孟鑫, 等. 天气雷达降水回波信号特征研究[J]. 现代雷达, 2016, 38(9): 12-16.
- [23] JAIN M, SAIHJPAL V, SINGH N, et al. An overview of variants and advancements of PSO algorithm[J]. Applied Sciences, 2022, 12(17): 8392.
- [24] 李薪颖, 单梁, 常路, 等. 复杂环境下基于多目标粒子群的 DWA 路径规划算法[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(4):52-59.
- [25] PERAL E, TANELLI S, STATHAM S, et al. RainCube: the first ever radar measurements from a CubeSat in space[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2019, 13(3): 032504.
- [26] KOLLIAS P, TANELLI S, BATTAGLIA A, et al. Evaluation of EarthCARE cloud profiling radar Doppler velocity measurements in particle sedimentation regimes[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 366-386.
- [27] PANG C, HOOGEBOOM P, LE CHEVALIER F, et al. A pulse compression waveform for weather radars with solid-state transmitters[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(10): 2026-2030.
- [28] BANDYOPADHYAY S, SAHA S, MAULIK U, et al. A simulated annealing-based multiobjective optimization algorithm: AMOSA[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(3): 269-283.
- [29] 邓绍强, 基于自适应模拟退火粒子群的最优化问题求解及其应用[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2022.

[作者简介]

- 贾 羽 1998 年生, 硕士研究生。
任 鹏 1981 年生, 博士, 教授。
江柏森 1982 年生, 硕士, 研究员。
张振华 1977 年生, 博士, 研究员。

(本文编辑: 潘三英)