

基于索引调制OFDM雷达通信共享信号压缩感知方法研究

左家骏* 杨瑞娟 李晓柏 李东瑾

(空军预警学院预警情报系 武汉 430019)

摘要: 针对在雷达通信一体化(RadCom)系统中正交频分复用(OFDM)共享信号通信速率不高、可靠性较差的问题, 该文提出一种采用子载波索引调制(IM)的OFDM共享信号方案(OFDM-IM)以及对应的基于压缩感知(CS)的雷达信号处理算法。该方案在发射端采用IM调制增强OFDM信号通信质量, 在雷达接收端采用CS技术获取目标的距离-速度2维超分辨图像, 进一步采用快速分段重构、2次相参积累的方法降低算法的计算复杂度。仿真实验表明, 相比于传统算法, 该方法能显著提升对OFDM-IM共享信号的处理性能, 并实现超低距离副瓣, 是一种能够同时增强雷达与通信性能的一体化共享信号方案。

关键词: 雷达通信一体化; 正交频分复用; 子载波索引调制; 压缩感知

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)12-2976-08

DOI: 10.11999/JEIT190740

A Compressed Sensing Method for Joint Radar and Communication System Based on OFDM-IM Signal

ZUO Jiajun YANG Ruijuan LI Xiaobai LI Dongjin

(Department of Early Warning Intelligence, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Considering the problems of low communication rate and poor reliability of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) signals in joint Radar and Communication (RadCom) system, a subcarrier Index Modulation (IM) based OFDM RadCom signal scheme (OFDM-IM) and a corresponding radar signal processing algorithm based on Compressed Sensing (CS) are proposed in this paper. In the scheme, IM modulation is adopted at the transmitting end to enhance the communication quality of OFDM signal, CS technology is adopted at the radar receiving end to obtain the range-velocity 2-D super resolution image of radar targets, and the method of rapid piecewise reconstruction and second phase-coherent accumulation are further adopted to reduce the computational complexity of the algorithm. Simulation results show that, compared with the traditional algorithm, this method can significantly improve the processing performance of OFDM-IM RadCom signal and realize ultra-low side lobe in distance, which means the proposed scheme is able to enhance the performance of radar and communication in the same time.

Key words: Radar and Communication (RadCom); Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Subcarrier Index Modulation (IM); Compressed Sensing (CS)

1 引言

雷达通信一体化(RadCom)共享信号技术近年来受到军事与民用领域的广泛关注^[1-4], 该技术使用一种信号同时实现雷达与通信两种功能, 不但能够有效降低机动平台的负重、能耗以及电磁干扰等问题, 而且能大大提高能量与频谱资源的利用率,

是装(设)备轻型化、能量集约化以及提高多功能电子系统电磁兼容性的有效途径。

在雷达通信一体化技术的应用场景中, 无论是战场环境探测监视、组网雷达协同, 还是智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS), 雷达都将产生大量的实时数据, 这就要求一体化系统的通信功能具有高速率的数据传输能力。随着研究不断深入, 高速率雷达通信一体化共享信号技术成为深化研究的重要问题。

相比于传统单载波共享信号^[1], 多载波的共享信号具有更高的频谱效率, 如正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,

收稿日期: 2019-09-25; 改回日期: 2020-10-20; 网络出版: 2020-10-23

*通信作者: 左家骏 zuojiajun59@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61271451)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61271451)

OFDM)信号。国内外学者对OFDM共享信号的波形优化设计^[2-5]、雷达信号处理^[6-10]等方面展开了深入研究,但目前仍存在通信速率不高、可靠性较差等问题^[11]。为了增强共享信号通信能力,本文提出了一种新的基于子载波索引调制(Index Modulation, IM)的OFDM(OFDM-IM)共享信号波形。索引调制是指在全部子载波中选择一部分传输信息,将剩余子载波置零,接收端通过检测激活子载波的位置获取附加的索引信息的一种技术^[12,13]。

OFDM-IM是通信领域提出的一种OFDM信号增强技术,在中低阶调制下,与传统OFDM信号相比,OFDM-IM信号的传输速率更高,且误码率性能更低。将其应用于雷达时,研究发现采用传统的处理方法^[10]存在动态范围下降的问题。因此,进一步提出了一种基于调制符号域压缩感知(Modulation Symbol-Domain based Compressed Sensing, MSD-CS)的信号处理方法。本文首先建立了信号的稀疏表示模型,然后采用分段稀疏恢复,最后采用2次相参积累的方法降低计算复杂度。仿真结果表明,OFDM-IM信号具有更好的通信性能,所提算法可有效消除通信信息随机性对雷达性能的影响,并实现超低距离副瓣,是一种能够同时提高雷达与通信性能的共享信号方案。

2 系统模型

2.1 发射信号模型

考虑一个脉冲重复间隔为 T_r 的脉冲体制雷达,发射信号为单个OFDM符号,持续时间为 T_{OFDM} ,OFDM符号由 N 个子载波数组成,则 P 个脉冲信号的复包络可表示为

$$s(t) = \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{n=0}^{N-1} d_{n,p} e^{j2\pi n \Delta f (t-pT_r)} \text{rect}\left(\frac{t-pT_r}{T_{\text{OFDM}}}\right) \quad (1)$$

其中, Δf 为相邻子载波的频率间隔,且有 $\Delta f = 1/T_b$ 。 T_b 为OFDM数据段的长度,为了提高子载波间的正交性,将OFDM符号的后一部分复制到符号前,形成长度为 T_g 的循环前缀(CP),有 $T_{\text{OFDM}} = T_g + T_b$ 。 $\text{rect}(\cdot)$ 表示定义在 $[0, 1]$ 上的矩形窗函数。 $d_{n,p}$ 表示第 p 个OFDM符号中第 n 个子载波上传输的数据。

2.2 子载波索引调制

OFDM-IM具体的调制方式如图1所示^[14]。首先,将所有子载波分为 G 个子块,每个子块包含 $N_s = N/G$ 个子载波,然后根据索引信息,从中激活 K_s 个,只在激活的子载波上进行星座图调制,其余载波置零。最后再进行IFFT及加入循环前缀等常规OFDM操作。经过IM调制后,在每个子块中,可传输 $b_1 = \lfloor \log_2 C_{N_s}^{K_s} \rfloor$ bit的索引信息,以及 $b_2 = K \log_2 M$ bit的调制信息, M 为星座图的点数。总传输信息量为 $b = G(b_1 + b_2)$ 。

按照上述调制方式产生 P 个脉冲的OFDM信号,为了统一表示激活子载波的索引,将 P 个OFDM符号的调制数据并串变换后排成一列,其中激活子载波的索引按照升序可排列为

$$\boldsymbol{\eta} = [\eta(1), \eta(2), \dots, \eta(KP)]^T \quad (2)$$

其中, $K = GK_s$, 表示一个OFDM符号中激活子载波的总数。

OFDM-IM调制十分灵活,通过改变子块以及激活子载波的个数,可使系统在传输效率和传输可靠性中达到平衡。图2给出了一个OFDM-IM信号的幅度谱,图3给出了在BPSK调制下,OFDM-IM信号与传统OFDM信号的误比特率比较^[12],图例中标明了IM调制参数与相应的频谱效率。可以看到,通过IM调制的OFDM信号,可达到与传统OFDM信号相同甚至更高的频谱效率,而且在较高比特信噪比的条件下,还具有更低的误比特率,起

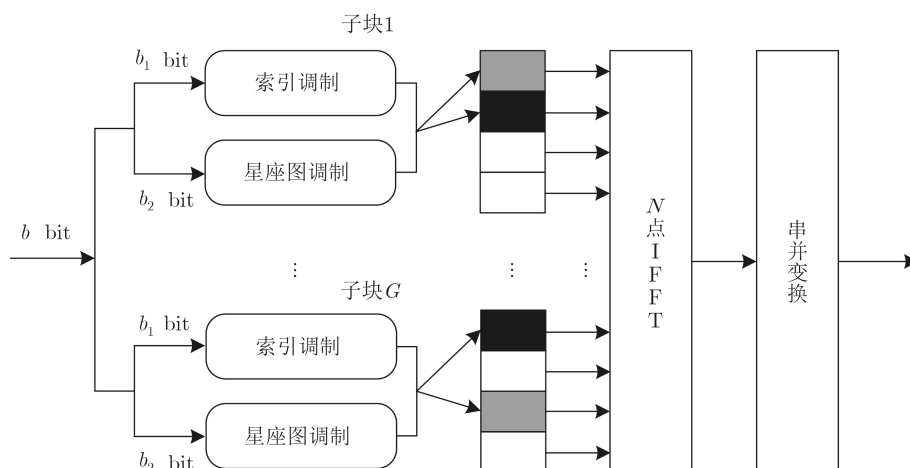


图 1 OFDM-IM信号产生示意图

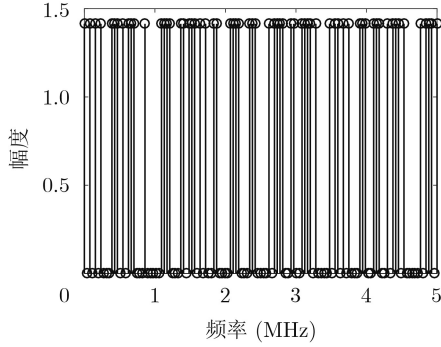
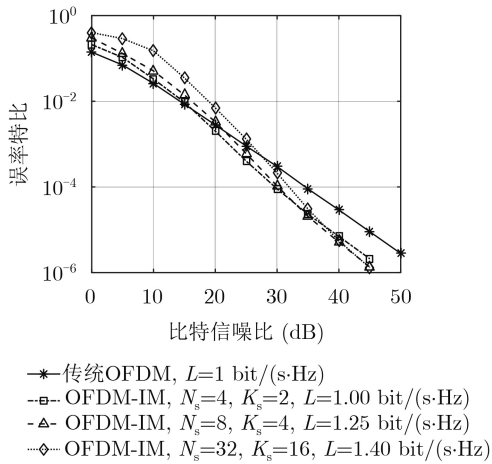
图2 OFDM-IM信号幅度谱($N=512$, $N_s=8$, $K_s=4$)

图3 OFDM-IM信号误比特率

到了很好的信号增强的作用。对OFDM雷达通信一体化共享信号采用IM调制,将能够有效提高共享信号的通信性能。

2.3 接收信号模型

为了使模型更为简洁,首先对接收信号做出以下假设:

- (1) 发射信号为窄带信号,目标可视为点目标。
- (2) 在相参处理间隔(CPI)内,目标处于同一距离单元中,或者距离徙动已得到补偿。
- (3) 目标的多普勒频移处于多普勒容限之中,多普勒频移引起的脉内相位变化可以近似忽略。
- (4) 接收信号的CP段已有效去除。

在上述假设条件下,建立单个点目标的回波信号模型。令目标的距离为 R ,径向速度为 V ,对应的时延为 $\tau = 2R/c$, c 为光速,目标多普勒频移为 $f_d = 2f_c V/c$,当发射信号为式(1)描述的OFDM共享信号时,该目标回波的复包络可表示为

$$y(t) = \alpha s(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} + \omega(t) \\ = \alpha \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{n=0}^{N-1} d_{n,p} e^{j2\pi n \Delta f (t - \tau - pT_r)} e^{j2\pi f_d t} \cdot \text{rect} \left(\frac{t - \tau - pT_r}{T_{\text{OFDM}}} \right) + \omega(t) \quad (3)$$

式(3)中 α 表示回波信号的复幅度, $\omega(t)$ 表示加性高斯白噪声,噪声方差为 σ^2 。以采样率 $f_s = B$ 对 $y(t)$ 进行采样,采样间隔 $T_s = 1/N\Delta f$,可得第 p 个脉冲的离散信号为

$$y_p(m) = \alpha \sum_{n=0}^{N-1} d_{n,p} e^{j2\pi \frac{mn}{N}} e^{-j2\pi n \Delta f \tau} e^{j2\pi f_d p T_r} + \omega_p(m), \\ m = 0, 1, \dots, N-1; p = 0, 1, \dots, P-1 \quad (4)$$

3 基于调制符号域的压缩感知方法

3.1 回波信号的稀疏表示

与通信处理的方法相同,首先对接收到的OFDM-IM信号进行解调,对第 p 个回波信号 $y_p(t)$ 离散傅里叶变换(DFT)可得

$$\hat{d}_{n,p} = \text{DFT}[y_p(m)] = \alpha d_{n,p} e^{-j2\pi n \Delta f \tau} e^{j2\pi f_d p T_r} + \omega'_p(m) \quad (5)$$

令 $D_{n,p} = \hat{d}_{n,p}/d_{n,p}$,并将 $\{D_{n,p}\}$ 写成矩阵形式有

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{0,0} & D_{0,1} & \dots & D_{0,P-1} \\ D_{1,0} & D_{1,1} & \dots & D_{1,P-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{N-1,0} & D_{N-1,1} & \dots & D_{N-1,P-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此,矩阵 \mathbf{D} 可以表示为

$$\mathbf{D} = \mathbf{F}_N \mathbf{X} \mathbf{F}_P^H + \tilde{\mathbf{W}} \quad (7)$$

式(7)中矩阵 \mathbf{X} 表示目标的距离-速度2维图像,当存在目标或者杂波时, \mathbf{X} 的对应距离、速度单元的元素具有非零值。 \mathbf{F}_N 与 \mathbf{F}_P 分别表示 N 维与 P 维的傅里叶变换矩阵, $(\cdot)^H$ 表示矩阵共轭转置。 $\tilde{\mathbf{W}}$ 表示噪声矩阵,矩阵中元素 $\tilde{\omega}_{n,p} = \omega'_{n,p}/d_{n,p}$ 。

根据式(7),传统的基于调制符号域(Modulation Symbol-Domain, MSD)方法^[10]可直接得到 \mathbf{X} 的估计值 $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{F}_N^H \mathbf{D} \mathbf{F}_P$ 。然而由于采用了IM调制,当发射符号 $d_{n,p}$ 为零时,观测矩阵元素 $D_{n,p}$ 趋于无穷大,导致该方法失效。因此,需要去除这些无效数据点之后再进行处理。根据矩阵乘积的向量化与Kronecker积的关系^[15],可将式(7)转化为向量形式

$$\text{vec}(\mathbf{D}) = (\mathbf{F}_P^H \otimes \mathbf{F}_N) \text{vec}(\mathbf{X}) + \text{vec}(\tilde{\mathbf{W}}) \quad (8)$$

式(8)中 $\text{vec}(\cdot)$ 表示将矩阵按列堆栈,符号 \otimes 表示矩阵的Kronecker积。根据式(2)表示的向量 $\boldsymbol{\eta}$,可以确定 $\text{vec}(\mathbf{D})$ 中有效数据的位置。因此,定义 $KP \times NP$ 维的选择矩阵 \mathbf{J} ,其矩阵元素为

$$J_{i,j} = \begin{cases} 1, & j = \boldsymbol{\eta}(i) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

在式(8)两边左乘矩阵 \mathbf{J} ,即可将有效数据筛选出。令 $\mathbf{d} = \mathbf{J} \text{vec}(\mathbf{D})$, $\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{J}(\mathbf{F}_P^H \otimes \mathbf{F}_N)$, $\mathbf{x} = \text{vec}(\mathbf{X})$, $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{J} \text{vec}(\tilde{\mathbf{W}})$,则式(8)可表示为

$$\mathbf{d} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{x} + \boldsymbol{\omega} \quad (10)$$

至此得到了目标回波的稀疏表示模型。当 \mathbf{x} 稀疏, 且 Φ 满足约束等距性(Restricted Isometry Property, RIP)条件时, 式(10)可转化为式(11)的基追踪去噪(Basis Pursuit Denoising Noise, BPDN)问题求解。

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \frac{1}{2} \|\mathbf{d} - \Phi \mathbf{x}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_1 \quad (11)$$

本文采用正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)算法求解该问题。

3.2 二次相参积累

在式(10)中, 感知矩阵 Φ 的维度为 $KP \times NP$, 因此, 当脉冲数较多时, 直接重构 \mathbf{x} 的算法复杂度和内存要求都非常高。为了降低计算量, 同时兼顾算法性能, 本文采用一种分段快速重构的方法, 将脉冲数据划分成子脉冲串分别重构, 然后2次积累得到最终结果。具体步骤如下:

假设一个CPI内的接收到的脉冲数为 P_m , 分成 L 个子脉冲串之后, 每一子脉冲串的脉冲数为 $P = P_m/L$ 。对于第 l 个子脉冲串数据, 采用3.1节的方法, 稀疏恢复后得到向量 $\hat{\mathbf{x}}_l$, 将其变为 $N \times P$ 维的矩阵 $\hat{\mathbf{X}}_l$, 然后通过傅里叶逆变换, 将其还原成对应子脉冲串的1维距离像。 L 个子脉冲串均照此处理后, 将结果组合起来进行第2次相参积累, 最终得到距离-速度2维像 $\hat{\mathbf{X}}$, $\hat{\mathbf{X}}$ 可表示为

$$\hat{\mathbf{X}} = \left[\hat{\mathbf{X}}_1 \mathbf{F}_P^H, \hat{\mathbf{X}}_2 \mathbf{F}_P^H, \dots, \hat{\mathbf{X}}_L \mathbf{F}_P^H \right] \mathbf{F}_{P_m} \quad (12)$$

信号处理流程如图4所示, 分段重构的过程中包含了1次相参积累, 通过2次积累, 进一步提高多普勒分辨率和增益。

3.3 计算复杂度及内存分析

首先定义1次复数乘法运算为计算复杂度单位, 以本文采用的OMP算法为例, 假设场景中的目标数量为 d , 即场景是 d -稀疏的, 则 P_m 个脉冲数据直接重构的运算量是^[16]

$$C_1 = O(dKNP_m^2) \quad (13)$$

采用分段处理的方法, 处理过程分为两部分, 首先在分段重构过程中, 计算量为 $L \cdot O(dKNP_m^2/L^2)$, 在2次积累过程中, 进行了 P_m^2 次FFT计算, 计算量

为 $P_m^2 \cdot O(N \lg N)$, 因此分段处理方法总的计算量为

$$C_2 = L \cdot O(dKNP_m^2/L^2) + P_m^2 \cdot O(N \lg N) = O(dKNP_m^2/L) \quad (14)$$

对比式(13)、式(14)可以看到, 分段重构方法使计算量降低了约 L 倍。

内存需求主要考虑感知矩阵的大小, 实部和虚部都由浮点数表示, 每个复数元素需要的内存空间为16 bit, 则 $KP_m \times NP_m$ 维感知矩阵 Φ 所需内存大小为

$$S_1 = 16KNP_m^2 \quad (15)$$

采用分段处理后, 感知矩阵维度变为 $KP \times NP$, 则占用内存大小为

$$S_2 = 16KNP_m^2/L^2 \quad (16)$$

式(16)表明, 采用分段处理的方法, 可使内存需求降低 L^2 倍。例如 $N=512$, $K=128$, $P_m=128$, $P=8$, 原方法所需内存为16 GB, 超出了普通计算机的处理能力, 而分段处理后内存仅需64 MB。因此, 该方法能够有效降低计算复杂度及内存要求。

4 仿真实验

本文所有实验都是在操作系统为Windows10的通用计算机上实现的, 仿真平台为Matlab2016a, 计算机主要参数为: 处理器为Intel i5 6300U, 主频2.4 GHz, 内存为8 GB。为比较分析本文方法的性能, 将MSD算法^[10]作为对比算法, 在该算法中将无效点置零避免计算发散。OFDM信号的基本参数如表1所示。

4.1 单脉冲距离像仿真

首先, 分别采用两种算法, 对单个点目标回波进行距离维处理, 目标距离为1920 m, IM调制参数为 $N_s=8$, $K_s=4$, 单脉冲距离像如图5所示。从图中可以看到, 当采用MSD算法时, OFDM-IM信号相比于传统OFDM信号的距离副瓣表现出更强的随机性。这是因为MSD算法通过将接收符号与发射符号相除, 使接收信号不仅补偿了相位谱, 也补偿了幅度谱, 因此去除了通信信息的影响, 距离像仅为

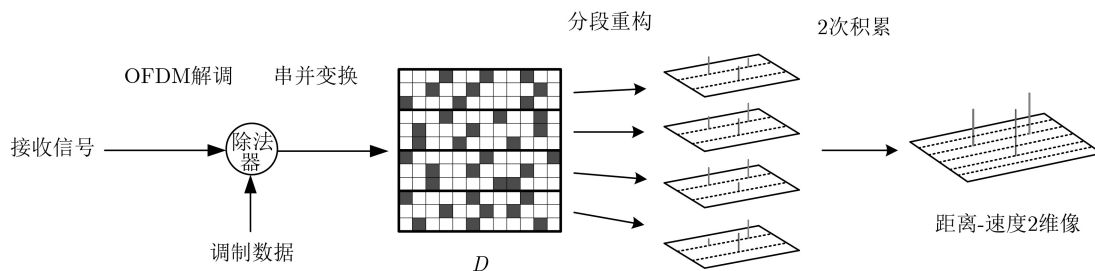


图4 MSD-CS算法信号处理流程图

傅里叶变换引起的副瓣。而OFDM经过IM调制之后，激活子载波的位置受索引信息调制，导致补偿后信号的幅度谱仍然是随机的，因此，MSD算法不能抵消索引信息，使距离副瓣表现出较大的随机波动。相比之下，采用MSD-CS算法后，彻底解决了OFDM-IM共享信号中通信信息对距离副瓣的影响，可实现超低距离副瓣和距离超分辨。

4.2 距离速度2维像仿真

在不同信噪比条件下，对MSD算法、 $P=1$,

表 1 OFDM信号参数

信号参数	取值
载波频率	2.4 GHz
信号带宽	20 MHz
脉冲宽度	26.8 μ s
OFDM数据段长度	25.6 μ s
循环前缀长度	1.2 μ s
子载波数	512
相参积累的脉冲数	64

$P=8$ 的MSD-CS算法的距离-速度2维图像进行仿真，为了避免信噪比损失，仿真中采用了矩形窗函数。3个实验目标的距离分别为[1350, 1350, 1560] m，速度分别为[-9.53, 19.07, 19.07] m/s，通过添加高斯白噪声使信噪比分别为-20 dB, -10 dB和0 dB，仿真结果如图6所示。从图中可以看到，两种算法

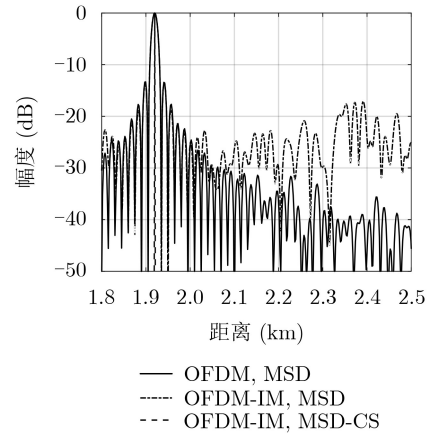


图 5 单脉冲距离像

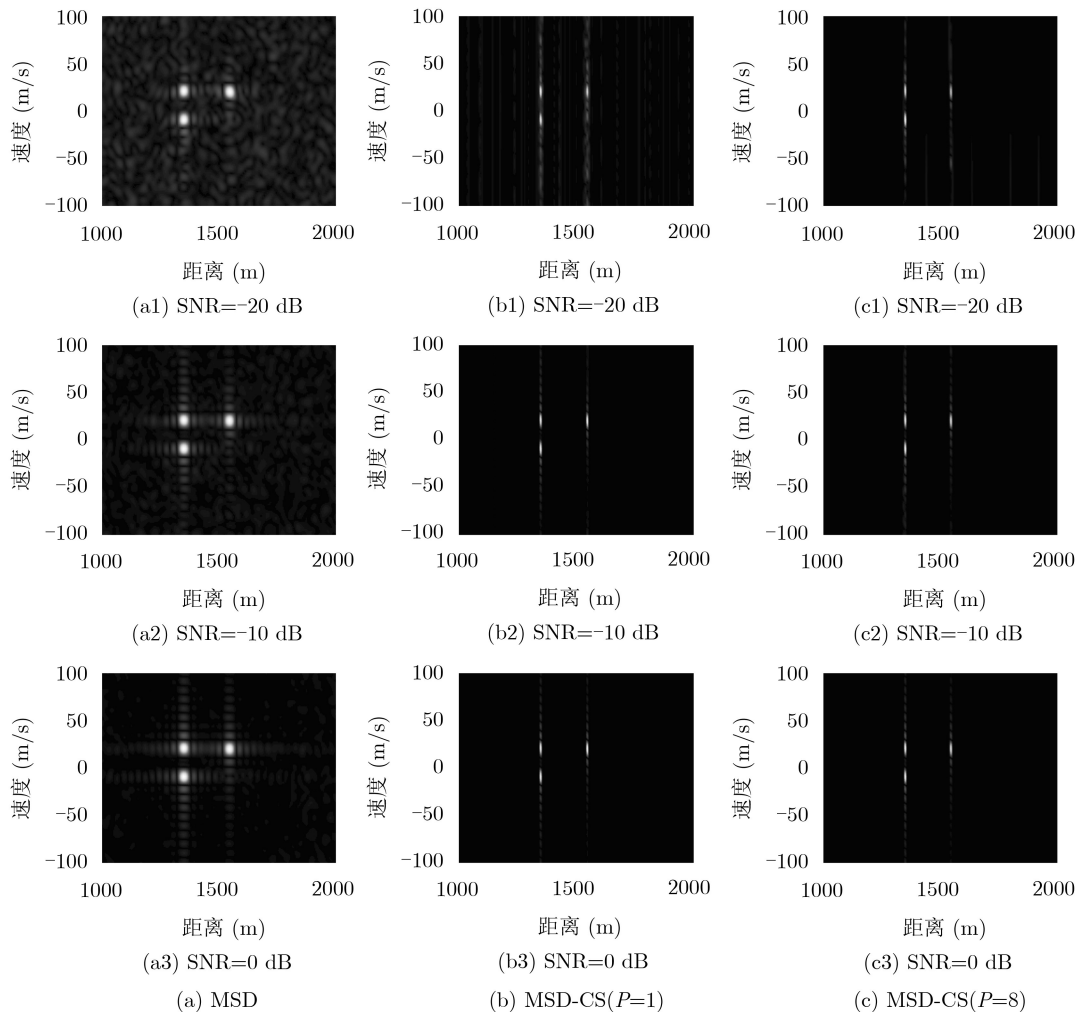


图 6 不同信噪比下MSD和MSD-CS算法仿真结果

都能准确估计目标的距离与速度。其中MSD算法得到的图像噪点较高，相比之下MSD-CS算法得到的图像更为清晰，信噪比有明显提高，并且副瓣主要集中在速度维上，原因是速度维处理采用了传统FFT方法。另外，对比 $P=1$ 与 $P=8$ 的MSD-CS算法，可以看到通过提高子脉冲的个数，可增强低信噪比条件下算法性能。

4.3 算法性能分析

进一步采用峰值副瓣电平(Peak to SideLobe ratio, PSL)、目标背景比(Target to Background Ratio, TBR)^[17]以及运行时间作为评价指标，对两种算法性能进行仿真，仿真中采用矩形窗函数，PSL与TBR统计中已将矩形窗函数的副瓣去除。

对于 $N_s=8, K_s=4$ 的OFDM-IM信号，首先仿真了MSD算法与子段脉冲数 P 分别为1, 2, 4和8的MSD-CS算法的PSL与TBR随信噪比变化曲线，如图7所示。从图7(a)可以看到，MSD算法的PSL随信噪比逐渐增加，但在高信噪比下趋于一个定值，原因是受到前述IM调制导致的信号随机性的影响。而在双对数坐标系下，MSD-CS算法的PSL随信噪比线性增加，并且子段脉冲数 P 越多，PSL越高。另外，由于OMP的抗噪声能力较弱，低信噪比下PSL明显下降，但通过增加脉冲数 P ，可有效

提高算法鲁棒性。图7(b)所示的TBR随信噪比变化曲线与PSL性质大致相同，不同之处在于，当 $P>1$ 之后，继续增加 P 无法进一步提高MSD-CS算法的TBR。

其次，通过改变IM调制参数 N_s 与 K_s ，使OFDM符号的有效载波数 K 分别为64, 128, 256和512，仿真了不同有效载波数条件下的PSL和TBR随信噪比变化曲线，如图8所示。从图8可以看到，MSD-CS算法的PSL和TBR几乎不随有效子载波数变化，这说明IM调制对MSD-CS算法性能没有影响。而在高信噪比下，MSD算法的PSL和TBR随有效载波数增加而增大， K 增加1倍，PSL和TBR随之提高约3 dB。当所有子载波均有效调制，即变为传统OFDM信号时，PSL和TBR不再出现瓶颈值，这说明MSD算法处理传统OFDM信号性能较好，但不适用于OFDM-IM信号。

最后，对不同分段数的MSD-CS算法的运行时间进行了统计，对子段脉冲数 P 从64减少到1时，运行时间曲线如图9所示，可见分段重构再2次积累的方法能够有效降低算法的运行时间，若在分段重构过程中采用并行计算，将能进一步提高算法运行速度。

5 结论

本文提出了一种新的OFDM-IM共享信号方

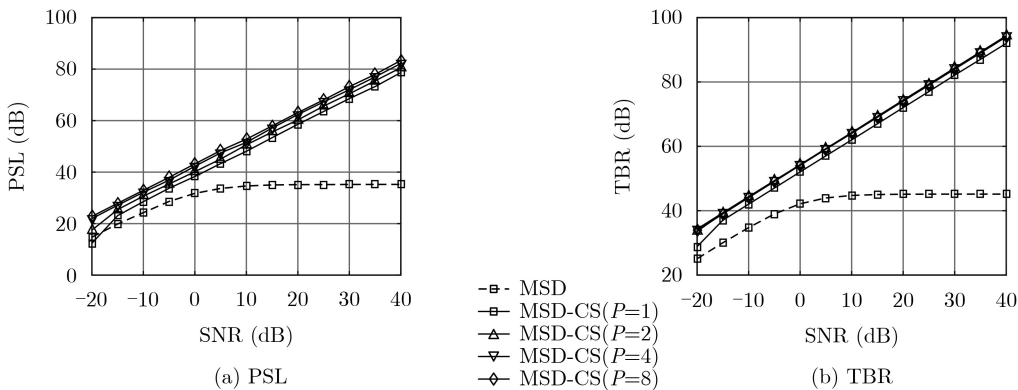


图7 不同子脉冲数条件下PSL和TBR随信噪比变化曲线($N_s=8, K_s=4$)

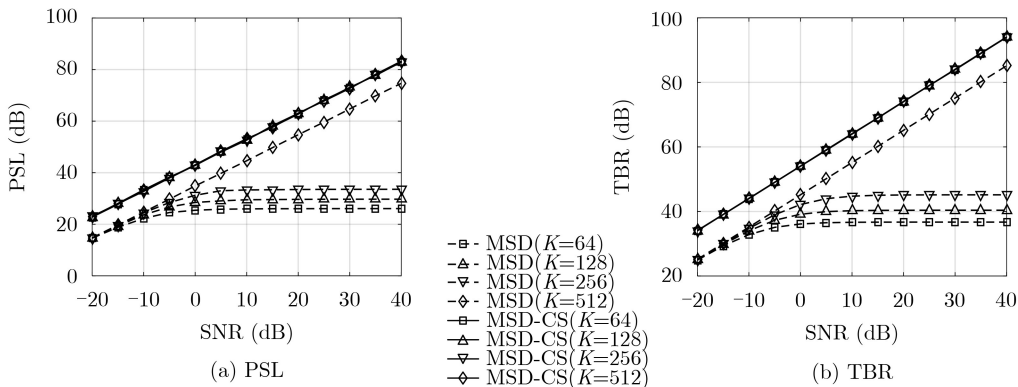


图8 不同有效载波数条件下PSL和TBR随信噪比变化曲线($P=8$)

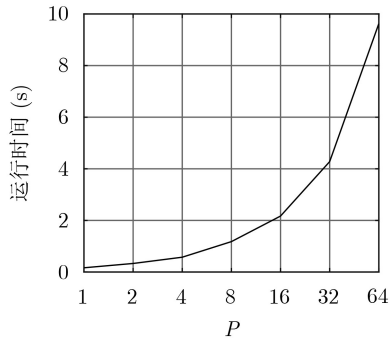


图9 运行时间随分段数变化曲线

案, 以及对应的雷达信号处理算法。该方案通过子载波索引调制增强信号的通信能力, 通过CS获取距离-速度2维超分辨图像, 通过分段重构、2次积累的方法降低算法的计算复杂度。仿真实验表明, 该方法能够有效消除通信信息对雷达性能的影响, 并实现超低的距离副瓣, 是一种能够同时增强雷达与通信性能的一体化共享信号方案。

参考文献

- [1] NOWAK M, WICKS M, ZHANG Zhiping, *et al.* Co-designed radar-communication using linear frequency modulation waveform[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2016, 31(10): 28–35. doi: [10.1109/MAES.2016.150236](https://doi.org/10.1109/MAES.2016.150236).
- [2] ZHOU Yifan, ZHOU Huilin, ZHOU Fuhui, *et al.* Resource allocation for a wireless powered integrated radar and communication system[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(1): 253–256. doi: [10.1109/LWC.2018.2868819](https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2868819).
- [3] 刘冰凡, 陈伯孝. 基于OFDM-LFM信号的MIMO雷达通信一体化信号共享设计研究[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(4): 801–808. doi: [10.11999/JEIT180547](https://doi.org/10.11999/JEIT180547).
LIU Bingfan and CHEN Baixiao. Integration of MIMO radar and communication with OFDM-LFM signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 801–808. doi: [10.11999/JEIT180547](https://doi.org/10.11999/JEIT180547).
- [4] LIU Yongjun, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, *et al.* Multiobjective optimal waveform design for OFDM integrated radar and communication systems[J]. *Signal Processing*, 2017, 141: 331–342. doi: [10.1016/j.sigpro.2017.06.026](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.06.026).
- [5] LIU Yongjun, LIAO Guisheng, XU Jingwei, *et al.* Adaptive OFDM integrated radar and communications waveform design based on information theory[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(10): 2174–2177. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2723890](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2723890).
- [6] KONG Bo, WANG Yuhao, LEUNG H, *et al.* Sparse representation based range-Doppler processing for integrated OFDM radar-communication networks[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 2017: 6528956. doi: [10.1155/2017/6528956](https://doi.org/10.1155/2017/6528956).
- [7] TIAN Xuanxuan, ZHANG Tingting, ZHANG Qinyu, *et al.* High accuracy doppler processing with low complexity in OFDM-based RadCom systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(12): 2618–2621. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2746563](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2746563).
- [8] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟, 等. 一种超分辨OFDM雷达通信一体化设计方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(2): 425–433. doi: [10.11999/JEIT150320](https://doi.org/10.11999/JEIT150320).
LIU Yongjun, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, *et al.* A Super-resolution design method for integration of OFDM radar and communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 425–433. doi: [10.11999/JEIT150320](https://doi.org/10.11999/JEIT150320).
- [9] TIGREK R F, DE HELJ W J A, and VAN GENDEREN P. OFDM signals as the radar waveform to solve Doppler ambiguity[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 130–143. doi: [10.1109/taes.2012.6129625](https://doi.org/10.1109/taes.2012.6129625).
- [10] STURM C and WIESBECK W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236–1259. doi: [10.1109/jproc.2011.2131110](https://doi.org/10.1109/jproc.2011.2131110).
- [11] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/10.11999/JEIT180515).
XIAO Bo, HUO Kai, and LIU Yongxiang. Development and prospect of radar and communication integration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 739–750. doi: [10.11999/JEIT180515](https://doi.org/10.11999/JEIT180515).
- [12] BAŞAR E, AYGÖLÜ Ü, PANAYIRCI E, *et al.* Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(22): 5536–5549. doi: [10.1109/tsp.2013.2279771](https://doi.org/10.1109/tsp.2013.2279771).
- [13] CHOI J. Coded OFDM-IM with transmit diversity[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(7): 3164–3171. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2699182](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2699182).
- [14] ABU-ALHIGA R and HAAS H. Subcarrier-index modulation OFDM[C]. The IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, Japan, 2009: 177–181. doi: [10.1109/PIMRC.2009.5449882](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2009.5449882).
- [15] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 77–78.
ZHANG Xianda. Matrix Analysis and Applications[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 77–78.
- [16] TROPP J A and GILBERT A C. Signal recovery from

- random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655–4666. doi: [10.1109/tit.2007.909108](https://doi.org/10.1109/tit.2007.909108).
- [17] 张磊. 高分辨SAR/ISAR成像及误差补偿技术研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2012: 36–37. doi: [10.7666/d.y2068190](https://doi.org/10.7666/d.y2068190).
- ZHANG Lei. Study on high resolution SAR/ISAR imaging and error correction[D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 2012: 36–37. doi: [10.7666/d.y2068190](https://doi.org/10.7666/d.y2068190).
- 左家骏: 男, 1990年生, 博士, 研究方向为雷达信号处理与雷达通信一体化.
- 杨瑞娟: 女, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理.
- 李晓柏: 男, 1983年生, 博士, 研究方向为现代通信技术、数字信号处理、雷达通信一体化.
- 李东瑾: 男, 1992年生, 博士, 研究方向为一体化系统智能应用.

责任编辑: 余蓉