

基于混沌滤波器的压缩感知雷达互质压缩采样

毛莹¹ 牛相²

(1. 中国电子科技集团公司第28研究所 南京 210007; 2. 海军北海舰队电磁频谱管理中心 青岛 266000)

摘要: 提出一种基于混沌数字滤波器的压缩感知雷达回波信号互质压缩采样方法。首先,设计基于混沌数字滤波器的压缩采样矩阵,避免了传统高斯随机观测矩阵的硬件设计困难,在保证压缩感知雷达感知矩阵非相关特性的同时,提高了压缩采样矩阵的可实现性与可控性。其次,在混沌数字滤波器压缩观测矩阵的基础上,提出进一步压缩数据量的互质压缩采样方法,显著降低了压缩感知雷达的数据处理量。仿真实验结果表明,基于混沌滤波器的互质压缩采样方法可以实现压缩感知雷达的在压缩处理数据量的同时获得目标参数的高精度估计,为压缩感知雷达硬件系统设计提供了新方法。

关键词: 压缩感知雷达; 压缩观测矩阵; 混沌滤波器; 互质采样

中图分类号: TN955 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Co-prime compressive sampling with chaotic filters for compressive sensing radar

Mao Ying¹ Niu Xu²

(1. The 28th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;

2. The Electromagnetic Spectrum Management Center of North China Sea Fleet, Qingdao 266000, China)

Abstract: A co-prime compressive sampling scheme based on chaotic digital filter is proposed. Compressive measurement matrix that employing chaotic digital filter avoid the problem of hardware implementation of classical Gaussian random measurement matrix. It also reduce the complexity of sub-sampling hardware implementation, while ensuring the incoherence of sensing matrix. For further reduction of data to be processed, a co-prime sampling method is devised for compressive sensing radar. Numerical results demonstrate that compressive radar system that using the proposed co-prime chaotic compressive sampling scheme can detect target's parameters accurately.

Keywords: compressive sensing radar; measurement matrix; chaotic filter; co-prime sampling

0 引言

现代雷达系统不断增加的信号带宽给雷达系统设计带来了困难。有限的采样频率限制了雷达系统探测精度的进一步提高。不断增加的数据量给雷达系统的数据传输、存储与处理均带来了困难。在雷达系统高精度要求下,降低雷达系统信号处理量的方法亟待提出。近年来提出的压缩感知理论^[1-4]便是一种能够降低信号采样频率的稀疏采样方法,其指出若信号在某个变换域可以由少数基向量的线性组合来表示,那么该信号在此变换域上是稀疏的,对该信号的采样可以使用低于 Nyquist 定理要求的采样率。压缩感知理论在压缩数据方面的优势使得压缩感知理论在无线通信、语音信号处理等方面得到了应用研究^[5-7]。

压缩感知理论一经提出,便吸引了雷达领域研究人员的目光。雷达信号回波的稀疏特性随着压缩感知理论的提

出而得到了发掘,将压缩感知理论应用于雷达系统为雷达系统进一步提高分辨率、降低采样率,实现高精度探测提供了新方法。压缩测量矩阵是压缩感知理论的重要环节,学者们围绕压缩感知理论中压缩观测矩阵展开了一部分研究^[8-12]。同样的,压缩观测矩阵的设计对于压缩感知雷达系统来说也非常的重要与关键,对于压缩感知雷达系统来说,观测矩阵即对应着雷达系统回波信号的采样过程,因此观测矩阵的设计决定了压缩感知雷达硬件系统实现的难易程度,可以看出,观测矩阵的设计是压缩感知雷达由理论研究向工程应用发展的重要研究环节。

目前的压缩感知理论中,凭借着与大部分稀疏变换基的低相关性,经典的高斯随机观测矩阵依然是在压缩感知理论中使用率较高的一种观测矩阵。近年来,随着模拟信息转换器(analog to information converter, AIC)相关内容的研究^[13-15],压缩感知理论正式向硬件系统设计方向

迈进。这也给压缩感知雷达系统的进一步发展带来了希望,只有从硬件系统上实际降低信号采样率,才能使压缩感知雷达工程化得以实现。

然而在现有的 AIC 框架中,在信号随机调制环节中普遍使用了高速伪随机序列,虽然其降低了对信号的采样频率,但是设计与获得高速伪随机调制序列的代价也相当高,尤其是在雷达系统等对信号带宽较大的场景下,现有的 AIC 模块硬件设计的难度与复杂度相当高。

为解决以上问题,本文结合雷达信号处理的特点,研究了一种针对雷达回波信号的压缩采样方法,提出一种用于压缩感知雷达系统且不需要高速伪随机调制序列的回波压缩采样框架,并设计了相应的压缩观测矩阵。并在其基础上,进一步提出一种基于互质采样的压缩感知雷达回波压缩采样方法。

1 信号模型

设雷达工作波长为 λ ,发射一串持续时间为 T_r ,脉宽 $\Delta t, l = T_r/\Delta t$ 个比特位的发射信号,在接下来的采样时间 T_r 内以 Δt 为周期对回波信号进行采样,采样点数为 $n = T_r/\Delta t$ 。则一个距离为 r ,速度为 v ,RCS 为 σ_{rv} 的点目标,回波信号可以表示为:

$$S_r(t) = \sigma_{rv} f(t - \tau_r) e^{2\pi i \omega_v t} \quad (4)$$

其中回波延迟 $\tau_r = 2r/c, c$ 为光速,多普勒频移 $\omega_v = -2v/\lambda$ 。将一个发射周期内的发射信号,一个接收采样周期内的接收信号离散化为:

$$\mathbf{f} = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_l]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{s} = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_n]^T \quad (6)$$

在无噪情况下,假设目标的 RCS 为 1,距离 $r = 0$ (为简便计,此处距离 r 指相对于雷达的盲距 $r_a = cT_r/2$ 的距离,即真实距离 $r' = r + r_a$),速度 $v = 0$ 。即 $(\tau_r, \omega_v) = (0, 0)$ 时回波矢量可以表示为:

$$\mathbf{s}_{(0,0)} = 1 \times [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_l \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0]_{1 \times n}^T \quad (7)$$

由式(7)可知,一个 RCS 为 σ_{rv} ,时移-频移信息为 (τ'_r, ω_v) 的目标,其回波信号为 $s_{(\tau'_r, \omega_v)}$ 经过时移、频移调制之后乘以系数 σ_{rv} 的离散信号。因此,将 (τ'_r, ω_v) 平面离散化,定义 Δt 为时移分辨率, $\Delta \omega = 2\pi/m$ 为多普勒频移分辨率,则:

$$\mathbf{s}_{(\tau'_r, \omega_v)} = \sigma_{rv} \mathbf{F}^k \mathbf{T}^j \mathbf{s}_{(0,0)} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & & & 0 \\ 1 & 0 & & \vdots \\ & \ddots & \ddots & \\ 0 & & 1 & 0 \end{pmatrix}_{n \times n}$ 为单位时移矩阵, $\mathbf{F} =$

$\begin{pmatrix} \omega_m^0 & & & 0 \\ & \omega_m^1 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \omega_m^{m-1} \end{pmatrix}_{n \times n}$ 为单位频移矩阵, $j =$

$\text{Round}(\tau_r/\Delta t), k = \text{Round}(\omega_v/\Delta \omega)$ 。现仅考虑能采到整个波形的回波信号的情况,则 $j \in \{0 \ 1 \ \dots \ n-l\}, k \in$

$\{0 \ 1 \ \dots \ m-1\}$,即雷达照射场景的范围为 $[0, c(n-l)\Delta t/2]$ 。每一个 (τ_r, ω_v) 对应的点目标均对应一个回波矢量 $\psi^{jk} = \mathbf{F}^k \mathbf{T}^j \mathbf{s}_{(0,0)}$ 。

当雷达照射区域存在 K 个点目标时,的回波信号可表示为多个点目标回波信号的叠加。定义

$$\Psi = [\psi^{00} \quad \psi^{01} \quad \psi^{02} \quad \dots \quad \psi^{0(M-1)} \quad \psi^{10} \quad \dots \quad \psi^{(n-l)(M-1)}]$$

为稀疏基, $\sigma = [\sigma_{00} \quad \sigma_{01} \quad \dots \quad \sigma_{(n-l)(m-1)}]^T$ 为目标 RCS 矢量。则 K 个目标的回波矢量可表示为:

$$\mathbf{s} = \Psi \sigma \quad (9)$$

其中, $\sigma_{jk} = 0$ 时表示时移-频移信息为 $(j\Delta t, k\Delta \omega)$ 的目标不存在, $\sigma_{jk} \neq 0$ 时表示时移-频移信息为 $(j\Delta t, k\Delta \omega)$ 的目标存在,且该目标 RCS 为 σ_{jk} ,也即 σ 中含有 K 个非零值,因此,当雷达照射区域内目标个数 K 满足稀疏性条件时, σ 为稀疏信号。

根据压缩感知理论,利用一个与稀疏变换基或稀疏冗余字典不相关的观测矩阵 Φ 可以实现对接收信号的压缩采样,其过程可以概括为

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{s} = \Phi(\Psi \sigma + \mathbf{e}) = \Gamma \sigma + \mathbf{e}' \quad (10)$$

其中 $\Gamma = \Phi \Psi$ 为感知矩阵, $\mathbf{e}' = \Phi \mathbf{e}$ 为观测噪声矢量。假设观测矩阵 Φ 的维度为 $M \times N$,则 $M < N$ 。因此使用观测矩阵的观测过程实际上对应着雷达系统回波信号的压缩采样过程。压缩感知理论指出,从压缩观测矢量 \mathbf{y} 中提取稀疏向量 σ 的过程是以下问题的优化求解过程

$$\sigma = \underset{\sigma}{\text{argmin}} \|\sigma\|_0 \quad \text{s. t.} \quad \|\mathbf{y} - \Gamma \sigma\|_2 \leq \epsilon \quad (11)$$

压缩感知理论的信号重构是一个非线性约束问题,是一个在非线性约束条件下利用少量观测数据通过求解欠定方程逆问题来恢复原信号的过程。目前国内外研究人员提出的稀疏优化重构算法大致可归为基于 ℓ_1 范数的凸优化方法、以正交匹配追踪(OMP)、压缩采样匹配追踪(CoSaMP)等为代表的贪婪追踪算法等经典算法。本文将使用凸优化求解工具箱 CVX 来求解式(11)所示的优化问题。

2 基于混沌滤波器的互质压缩采样框架

考虑到压缩感知理论中随机观测矩阵在等效的压缩采样框架设计上实现难度过大,同时现有的模拟信息转换 AIC 模块中高速伪随机序列在硬件设计上复杂度非常高。本节将设计一种基于混沌数字滤波器的压缩感知雷达互质压缩采样框架。如图 1 所示,本节提出的压缩感知雷达回波信号压缩采样框架首先将接收信号通过一个低速 A/D 转换器(analog-to-digital converter, ADC)采样得到采样信号 $y(n)$,得到的采样信号通过所设计的混沌数字滤波器,再经过互质采样函数与数据选择器的抽取,最终得到压缩观测信号 $r(n)$ 。

滤波器结构的观测矩阵^[16-18]结构如图 2 所示,文献指出观测矩阵各行之间越不相关,则对应的感知矩阵列相关性越低,也就能够获得更高的稀疏重构性能。

根据图 2 所示的观测矩阵的结构,可以看出观测矩阵

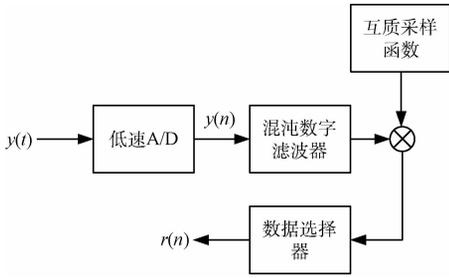


图 1 基于混沌滤波器的互质压缩采样流程

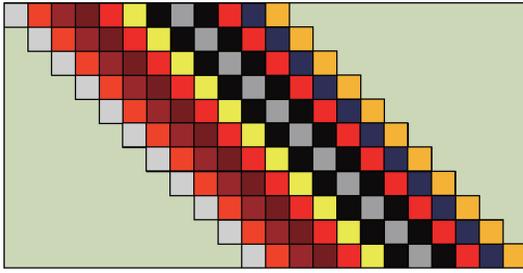


图 2 滤波器结构观测矩阵结构示意图

各行之间的相关性即为滤波器系数的自相关特性。因此，针对滤波器结构的观测矩阵，通过自相关函数接近冲激响应的滤波器系数，可以得到行相关性较低的观测矩阵。受混沌信号接近冲激响应的自相关特性启发，通过混沌数字滤波器构成的观测矩阵既能够保证感知矩阵各列之间的低相关性，同时相较于随机观测矩阵更容易设计与硬件实现。

本文中采用的混沌滤波器采用经典的 Logistic 映射来产生，一维 Logistic 映射的表达式如下：

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n) \tag{12}$$

式中： $x_n \in (0,1)$ ， μ 为 Logistic 映射参数。文献指出，当 $3.569\ 95 \leq \mu \leq 4$ 时，系统将进入混沌状态，迭代产生的值处于一种伪随机分布状态，且 μ 越接近 4，则系统的混沌性越高。

由此，可以得到图 1 所示互质压缩采样所对应的压缩观测矩阵结构如图 3 所示。

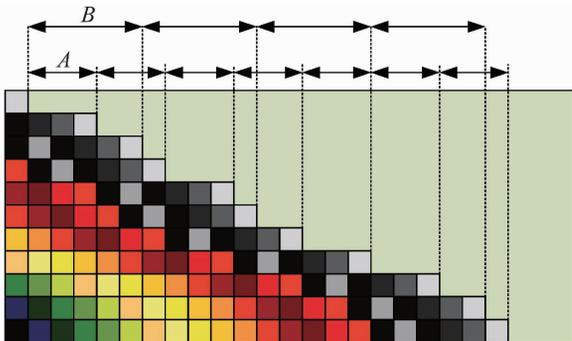


图 3 基于混沌滤波器的互质压缩观测矩阵结构

从图中可以看出，混沌数字滤波器按照一组互质的值 A 与 B 作为步长来进行移位的。 A 与 B 是互质的，即两者的最大公约数为 1。结合图 3 与图 2 可以看出，互质压缩观测矩阵实质上即为理想滤波器观测矩阵按照互质系数 A, B 的抽取。在本文中，定义互质采样函数 $w(n)$ 为

$$w(n) = \begin{cases} 1, & n = AT_s \\ 1, & n = BT_s \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{13}$$

随后通过数据选择器将互质抽取后数据中的非零元素取出得到压缩采样信号 $r(n)$ 为

$$r(n) = \Phi\Psi\sigma + \Phi\epsilon \tag{14}$$

在得到压缩感知雷达压缩采样信号 $r(n)$ 后，如前所述，需要通过求解一个优化问题来从压缩采样信号 $r(n)$ 中得到包含目标信息的稀疏向量 σ 。式(11)中所示的优化问题可以等效为以下优化问题

$$\min_{\sigma} \|\sigma\|_1 + \lambda \|r - \Gamma\sigma\|_2 \tag{15}$$

其中系数 λ 与噪声水平 ϵ 相关，在本文中，选取 $\lambda = \epsilon \sqrt{\log(\rho)}$ ， ρ 为感知矩阵的基向量数。利用凸优化求解工具 CVX 工具箱来实现优化上式对应的稀疏优化求解算法。

3 仿真结果

为简便起见，仿真实验仅通过对目标的距离位置估计来验证本文提出的基于混沌滤波器的压缩感知雷达互质压缩采样框架。假设空间内存在 3 个点目标，因此目标稀疏场景的稀疏度为 $K=3$ 。3 个目标的雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 中心距离压缩感知雷达系统的距离分别为 11、19 与 30 m。3 个目标的归一化反射系数分别为 0.4、0.3 与 0.6。混沌数字滤波器的长度为 27。压缩感知雷达系统的发射信号带宽为 100 MHz，互质压缩采样框架中的前端低速 A/D 转换模块速率为 50 MHz。

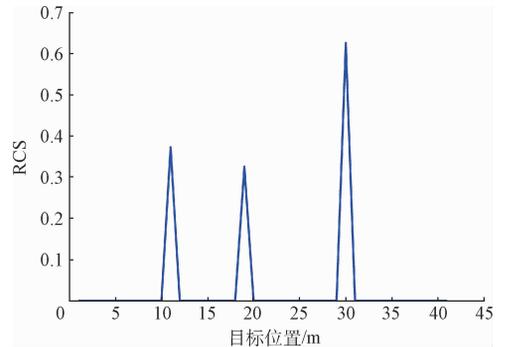


图 4 当信噪比为 5 dB 时，3 个目标与压缩感知雷达系统的相对距离的估计结果

图 4 给出了当信噪比为 5 dB 时，3 个目标与压缩感知雷达系统的相对距离的估计结果。从图中可以看出当信噪比较高的情况下，目标的相对距离与反射系数均可以得到准确的估计。

同样对不同信噪比情况下压缩感知雷达采用本文所提出的互质压缩采样模块对目标距离参数进行估计的结果进行了仿真实验。1 000 次蒙特卡洛实验的仿真结果如图 5 所示。

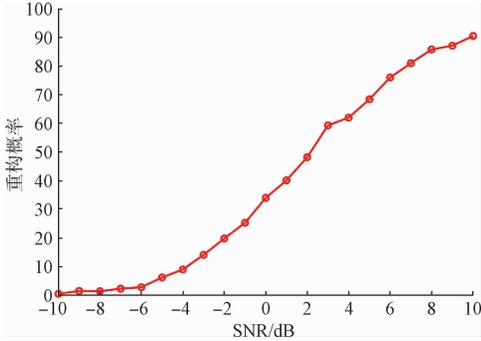


图 5 信噪比在 -10 dB 至 10 dB 之间压缩感知雷达对 3 个目标的距离信息估计的重构概率

图 5 给出了信噪比在 -10~10 dB 压缩感知雷达对 3 个目标的距离信息估计的重构概率。这里将所有目标的距离信息都被准确估计定义为一次成功的重构,从仿真结果图中可以看到,当信噪比达到 10 dB 的时候,压缩感知雷达对 3 个目标的距离估计重构概率已经达到了 90% 以上。

最后,实验对 3 个目标 RCS 估计的均方根误差 (root mean square errors, RMSE) 进行了仿真,首先给出压缩感知雷达目标 RCS 估计的 RMSE 的定义,

$$RMSE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [(\hat{\eta}_{k,m} - \eta_k)^2]} \quad (16)$$

图 6 给出了在不同信噪比情况下如前假设的 3 个目标的距离估计的 RMSE 曲线,

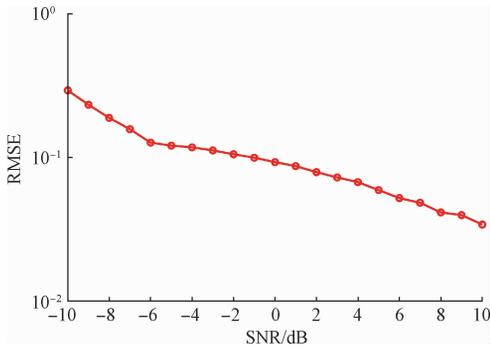


图 6 压缩感知雷达目标 RCS 估计 RMSE 曲线

从上图中可以看出当信噪比较高的情况下,压缩感知雷达采用本文提出的互质压缩采样框架可以准确的对目标 RCS 进行估计。在信噪比较低的情况下,目标 RCS 估计的误差也在系统可以容忍的范围内。

以上仿真结果证明了本文提出的互质压缩采样框架的有效性。压缩感知雷达可以通过互质压缩采样框架对感兴趣区域内的目标参数进行准确的估计。

4 结 论

本文提出了一种针对压缩感知雷达的互质压缩采样框架,该框架利用混沌数字滤波器替代传统滤波器结构压缩采样框架中的高斯随机滤波器,在保证压缩感知雷达感知矩阵低相关性的同时,降低了压缩采样框架的硬件设计难度。在此基础上,利用互质抽取函数与数据选择器,实现了压缩感知雷达接收信号的互质采样,进一步降低了压缩感知雷达的处理数据量。仿真结果证明了在采用本文所提出互质压缩采样框架的压缩感知雷达在采样率低于奈奎斯特采样频率的情况下,仍然能够对目标参数进行准确的估计。

参 考 文 献

- [1] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5):1070-1081.
- [2] 付争, 芮国胜, 田文飏. 准稀疏信号的压缩感知重构[J]. 电子测量技术, 2011, 34(6):33-36.
- [3] FORNASIER M, RAUHUT H. Compressive sensing[J]. Handbook of Mathematical Methods in Imaging, 2011, 56(4):IV-V.
- [4] BARANIUK R G, CEVHER V, DUARTE M F, et al. Model-based compressive sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(4): 1982-2001.
- [5] 孙斌, 金心宇. 压缩感知在无线传感器网络目标跟踪中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(5): 463-468.
- [6] 余恺, 李元实, 王智, 等. 基于压缩感知的新型声信号采集方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 105-112.
- [7] 王康, 叶伟, 劳国超, 等. 一种基于压缩感知的宽带 SAR 信号侦察方法[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4):40-43.
- [8] 孔舒亚, 叶伟, 劳国超. 基于压缩感知的 SAR 宽带干扰抑制方法[J]. 电子测量技术, 2016(11): 160-163.
- [9] 刘记红, 徐少坤, 高勋章, 等. 压缩感知雷达成像技术综述[J]. 信号处理, 2011, 27(2):251-260.
- [10] 刘记红, 徐少坤, 高勋章, 等. 基于随机卷积的压缩感知雷达成像[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(7):1485-1490.
- [11] ENDER J H G. On compressive sensing applied to radar [J]. Signal Processing, 2010, 90(5): 1402-1414.
- [12] YU Y, PETROPULU A P, POOR H V. Compressive sensing for MIMO radar [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE, 2009:3017-3020.

- [13] 张弓, 文方青, 陶宇, 等. 模拟-信息转换器研究进展[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(2):229-238.
- [14] 陈宇科, 汪立新, 吴剑锋. 压缩采样中模拟信息转换器的性能仿真[J]. 电子器件, 2011, 34(1):81-84.
- [15] TAHERI O, VOROBYOV S A. Segmented compressed sampling for analog-to-information conversion: method and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 59(2):554-572.
- [16] 张劲东, 张弓, 潘汇, 等. 基于滤波器结构的压缩感知雷达感知矩阵优化[J]. 航空学报, 2013, 34(4):864-872.
- [17] 崔翔. 基于卷积压缩感知的确定性测量矩阵研究[D]. 北京:北京化工大学, 2015.
- [18] 郝金双, 苗锋, 汪洋. 基于压缩感知的穿墙雷达成像虚像抑制方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(2):68-72.

作者简介

毛莹, 1990年出生, 助理工程师, 主要研究方向为信息系统集成。

E-mail: maoying20303@163.com

牛栩, 1967年出生, 高级工程师, 主要研究方向为信息系统。