

# 单比特量化交叉调制效应及其对雷达探测影响分析

吴岳洲<sup>1</sup>, 刘仕奇<sup>2\*</sup>, 王星怡<sup>1</sup>, 李冰<sup>3,4</sup>

1. 中国民用航空飞行学院计算机学院, 广汉 618307

2. 深圳大学电子与信息工程学院, 深圳 518060

3. 西南交通大学电气工程学院, 成都 611756

4. 东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096

**摘要** 随着雷达技术的飞速发展与快速应用, 以及对目标信息精细化需求的提升, 雷达带宽和数据量也越来越大, 在一定程度上限制了雷达设备的进一步应用。为解决这一问题, 单比特技术因其降低数据量的优势, 正越来越受到重视。但是, 单比特量化的高度非线性过程会带来频率交叉调制, 使信号成分极大地复杂化, 这将给雷达探测带来新的挑战。针对这一问题, 从底层机理上对单比特量化的非线性过程进行深入剖析, 从理论上推导明晰了单比特量化过程中的量化噪声的理论模型, 并进一步分析了这一非线性过程对雷达探测的影响。

**关键词** 雷达; 单比特量化; 交叉调制; 虚假目标

现代战争已经演变为大量利用信息资源并高度依赖信息技术的信息化战争, 战场态势感知和信息获取的效率已成为决定战争成败的关键因素<sup>[1]</sup>。雷达作为战场的“千里眼”“顺风耳”, 能够在恶劣复杂的环境下, 进行全天时、全天候的可靠感知, 是现代战场进行信息获取不可或缺的基本手段, 已被大量运用到战场解决目标探测、定位、识别等作战任

务, 在战前情报侦察、战中态势感知、战后效果评估等各作战环节具有不可替代的作用<sup>[2-6]</sup>。

随着无人机、微型机器人等小型、移动、无人平台的快速发展与战场应用, 雷达系统能够以更加灵活的方式工作, 满足更加丰富多变的现代化战场的应用场景。与此同时, 随着作战要求对目标信息获取质量的提升, 对雷达探测准确性和分辨率的需求

收稿日期: 2022-08-24; 修回日期: 2022-12-26

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1801); 毫米波国家重点实验室基金项目(K202235); 中央高校基本科研业务费专项(ZJ2022-004); 国家重点研发计划项目(2021YFF0603904); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515110125)

作者简介: 吴岳洲, 博士, 研究方向为电磁频谱监测、雷达信号处理、计算机视觉等, 电子信箱: wuyuezhou@cafuc.edu.cn; 刘仕奇(通信作者), 博士, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像与识别等, 电子信箱: liu.shiqi@outlook.com

引用格式: 吴岳洲, 刘仕奇, 王星怡, 等. 单比特量化交叉调制效应及其对雷达探测影响分析[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 99-103; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.05.010

越来越高。这往往需要高性能的硬件平台和复杂的系统架构作为支撑。但是,平台有限的尺寸和运算资源等物理限制,将极大地约束雷达系统可利用的硬件资源,限制其对目标的探测和成像性能。这对雷达系统的轻量化提出了更加迫切的需求。因此,如何有效解决雷达系统性能与平台有限资源之间的矛盾,在保障雷达对目标探测性能和效率的前提下,最大程度地降低硬件资源需求,是雷达系统轻量化研究的热点与难点,也是推动其在小型、移动、无人平台推广应用的关键<sup>[7-8]</sup>。

单比特雷达能够利用单比特技术节约存储、传输、算力资源,解决高精度采样成本高昂、海量数据处理效费比低、平台载荷资源受限、系统处理效率不足等问题,能够在资源受限条件下快速实现对目标的精细刻画,保障对战场环境的监测能力,有力支撑情报侦察、态势感知、战果评估等需求<sup>[9-15]</sup>。

单比特量化虽然可以简化模数转换器,降低数据量,但其量化过程中仅保留采样值的符号位,这一非线性过程将极大地复杂化信号成分,并引入大量量化噪声,降低信噪比,给雷达目标探测和成像带来严峻挑战。因此,需要深入剖析单比特量化的非线性效应,探明这一极简化过程中的深层机理,为单比特雷达的目标信息恢复和数据处理提供底层理论支撑。

现有单比特相关研究主要是基于文献[1]中的高阶谐波模型,其中提出了抑制高次谐波的方法<sup>[2-4]</sup>。上述研究主要基于单一信号量化过程中的非线性特性进行分析和处理。当对多信号成分进行单比特量化时,除了上述文献中所提的高阶谐波激增问题,还存在各信号成分之间的交叉调制效应,这将使单比特量化后的信号极度复杂化。本研究将针对单比特量化过程中的交叉调制效应进行深入分析,从理论上剖析多信号交叉调制形成的深层机理,并探讨其对雷达探测的影响,为未来基于单比特量化的雷达系统设计提供理论参考。

## 1 单比特量化频率交叉调制效应分析

当对信号进行单比特量化时,由于量化过程的

极度非线性,信号频率成分之间会互相调制,产生很多新的信号频率成分,使得量化后的信号变得极为复杂。下面以含有2个信号成分的信号为例进行单比特量化中频率交叉调制效应分析。

$$s_0(t) = A_1 \exp[j(2\pi f_1 t + \psi_1)] + A_2 \exp[j(2\pi f_2 t + \psi_2)] \quad (1)$$

对式(1)进行单比特量化处理

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \text{csign}(s_0(t)) \\ &= \text{sign}(A_1 \cos \psi + A_2 \cos \varphi) + \\ &\quad \text{jsign}(A_1 \sin \psi + A_2 \sin \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\psi = 2\pi f_1 t + \psi_1$ ,  $\varphi = 2\pi f_2 t + \psi_2$

那么,式(2)的实部可以计算为

$$\begin{aligned} \Re\{s_1(t)\} &= \text{sign}(A_1 \cos \psi + A_2 \cos \varphi) \\ &= -\frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp[j\omega(A_1 \cos \psi + A_2 \cos \varphi)]}{\omega} d\omega \quad (3) \\ &= -\frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(j\omega A_1 \cos \psi) \exp(j\omega A_2 \cos \varphi)}{\omega} d\omega \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} J^{m+n+1} \varepsilon_m \varepsilon_n A_{m,n} \cos(m\psi) \cos(n\varphi) \end{aligned}$$

式中,  $\varepsilon_m$ 、 $\varepsilon_n$  和  $A_{m,n}$  分别为

$$\varepsilon_m = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 2, & m \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 2, & n \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$A_{m,n} = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_n(A_1 \omega) J_m(A_2 \omega)}{\omega} d\omega \quad (6)$$

同理,式(2)的虚部可以计算为

$$\begin{aligned} \Im\{s_1(t)\} &= \text{sign}(A_1 \sin \psi + A_2 \sin \varphi) \\ &= -\frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp[j\omega(A_1 \sin \psi + A_2 \sin \varphi)]}{\omega} d\omega \\ &= -\frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\left[j\omega A_1 \cos\left(\psi - \frac{\pi}{2}\right)\right] \exp\left[j\omega A_2 \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right]}{\omega} d\omega \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} J^{m+n+1} \varepsilon_m \varepsilon_n A_{m,n} \cos\left[m\left(\psi - \frac{\pi}{2}\right)\right] \cos\left[n\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right] \end{aligned} \quad (7)$$

将式(3)和式(7)代入式(2),可得

$$s_1(t) = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} j^{m+n+1} \varepsilon_m \varepsilon_n A_{m,n} \left\{ \exp \left[ j \left( 2\pi (-1)^{\frac{m+n-1}{2}} (mf_1 + nf_2)t + m\psi_1 + n\psi_2 \right) \right] + \exp \left[ j \left( 2\pi (-1)^{\frac{m-n-1}{2}} (mf_1 - nf_2)t + m\psi_1 - n\psi_2 \right) \right] \right\} \quad (8)$$

从式(8)可以看出,原信号经过单比特量化后,生成了一系列的原信号频率成分的高阶谐波的组合,这样就使得量化信号频率成分变得极为复杂。另外,值得注意的是,对于式(6)中的系数,当 $m+n$ 为偶数时,式中的被积函数为偶函数,考虑到其积分区间关于原点对称,此时,积分值为0。因此,量化信号中仅存在 $m+n$ 为奇数时的成分。但是量化信号中仅 $m=1, n=0$ 和 $m=0, n=1$ 对应的信号成分频率与量化前信号相同,为有用信号。所以,在基于单比特量化的信号处理中,需要想办法提取这些成分,而抑制其他成分。

## 2 交叉调制对雷达探测影响

对于雷达系统,在利用传统窄带信号进行目标探测时,往往存在探测距离和探测分辨率之间的矛盾。而利用线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号进行目标探测时,则可以基于脉冲压缩,通过大的时宽形成较大的发射能量从而获得大的探测距离,同时,通过大的信号带宽获得较高的目标分辨率。因此,通过 LFM 信号可以同时实现大带宽和高分辨的探测性能。基于 LFM 信号的雷达获得了广泛应用。

随着各类应用对目标探测精度和分辨率需求的提高,与之相适应,雷达带宽也越来越宽,这将直接导致采样率要求的提升。而在传统雷达中,采用高精度量化尽可能降低量化误差,提高系统精度。而高采样率叠加高精度量化将急剧增加雷达系统的数据量。相比之下,单比特量化仅保留符号位,具有较低的数据量优势。

在利用 LFM 信号进行目标探测时,雷达发射

信号可以表示为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(j2\pi f_0 t + j\pi K t^2) \quad (9)$$

式中, $t$ 为时间, $T$ 为脉冲宽度, $\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)$ 为矩形函数, $f_0$ 为载波频率, $K$ 为条频率。

当雷达发射信号经由目标反射后,回波信号将会携带目标信息,目标回波可表示为

$$s_n(t) = \rho_n \text{rect}\left(\frac{t - 2R_n/c}{T}\right) \times \exp\left[j\pi K \left(t - \frac{2R_n}{c}\right)^2\right] \times \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_n\right) + w_n \quad (10)$$

式中, $\rho_n$ 为目标散射系数, $R_n$ 为目标距离, $c$ 为光速, $w_n$ 为噪声。

当采用去调频方式进行处理时,目标回波首先与参考信号进行混频,然后对混频结果进行采样量化,进而对其进行傅里叶变换即得到雷达的距离像。

去调频方式下的参考信号为

$$s_r(t) = \exp(-j\pi K t^2) \quad (11)$$

将式(10)与式(11)相乘得

$$s_{\text{dechirp}}(t) = \rho_n \text{rect}\left(\frac{t - 2R_n/c}{T}\right) \times \exp\left[j\pi K \left(\frac{4\pi R_n}{c} t\right)\right] \times \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_n - j\pi K \frac{4R_n^2}{c^2}\right) + w_n \quad (12)$$

对式(12)进行傅里叶变换,可得

$$s_{\text{dechirp}}(f) = \rho_n T \sin c \left[ T \left( f - K \frac{2R_n}{c} \right) \right] \times \exp\left(-j\frac{4\pi R_n/c}{T} f\right) + w_f \quad (13)$$

式(13)即为点目标的距离像,从式(13)可以看出,一个距离为 $R_n$ 的点目标将在 $\frac{2KR_n}{c}$ 处形成一个尖峰。

在传统雷达的处理中一般为线性处理,可线性还原目标信息。而根据式(8)中的单比特信号模型,在单比特雷达中,由于单比特量化的非线性特性,将在不同目标回波之间形成交叉调制,这将使

得单比特回波频率成分极大地复杂化,而每个频点都对应着一个目标,这将在雷达距离像中产生很多虚假目标,从而降低真实目标的辨识度。

图1所示为高精度量化时2个点目标的距离像。从图中可以看出,在高精度量化下,量化误差可以忽略,因此可以形成2个清晰的尖峰,并且在其他地方也无明显底噪。

图2所示为单比特量化时2个点目标的距离像。从图中可以看出,由于单比特量化的非线性,使得量化过程中各频率分量之间形成繁复的交叉调制,所以,相对于高精度数据较好地体现目标信息,在单比特量化信号对应的距离像中,除了2个真实目标外,还有许多其他虚假目标。并且,图2中的距离像中还具有明显的底噪。

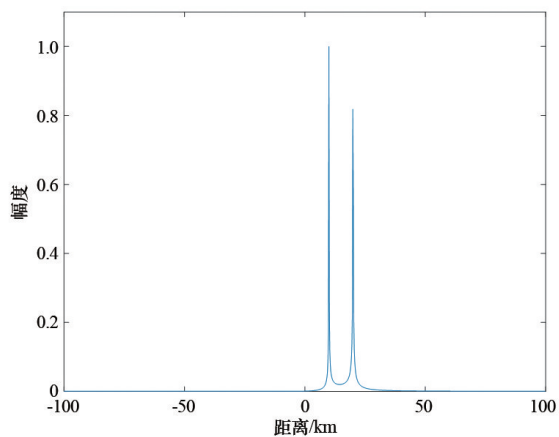


图1 高精度量化下2个点目标的距离像

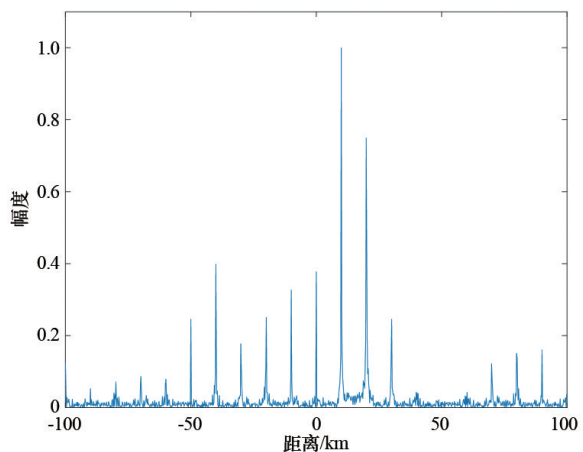


图2 单比特量化下2个点目标的距离像

### 3 结论

本研究对单比特量化过程中的交叉调制效应进行了详细的剖析,明晰了信号频率成分之间的交叉调制机理和表现形式。并以此为基础分析了单比特量化中的交叉调制效应对雷达目标探测的影响。相对于传统高精度量化,虽然单比特量化可以在很大程度上通过减少量化位数来降低数据量,但是其高度非线性过程将造成信号频率成分之间的交叉调制,从而使得信号频率成分复杂化。而在雷达目标探测中,这一效应将导致大量虚假目标的产生,以及背景噪声的提升,使得真实目标信息难以辨别。因此,在未来的单比特雷达研究中,需要针对这一效应,有针对性地设计交叉调制抑制方法,抑制量化信号中的交叉调制成分,从而有效减少虚假目标的产生,减少雷达虚警,有效凸显真实目标信息。目前,有部分研究针对单比特量化过程中高阶谐波的抑制需求提出了解决方案,如基于压缩感知的方法、基于近似消息传递的方法、基于可变阈值的方法等,但是上述方法目前仅在针对高阶谐波的模型中进行了相关分析,由于交叉调制和高阶谐波的形成机理并不完全相同,所以对于交叉调制效应的抑制是否有效,需进一步探索,但可以这些方法作为参考,在考虑交叉调制产生具体场景和需求的同时,有针对性地设计交叉调制抑制方法,提高雷达系统的探测性能。

### 参考文献 (References)

- [1] 来嘉哲, 方广有, 刘帅. 战场电磁环境构建中的抛物方程应用研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 63-68.
- [2] 何子述, 程子扬, 李军, 等. 集中式 MIMO 雷达研究综述[J]. 雷达学报, 2022, 11(5): 805-829.
- [3] Stimson G W. Introduction to airborne radar[M]. 2nd ed. Stevenage, Herts: SciTech Publishing, 1998.
- [4] Sun S, Petropulu A P, Poor H V. MIMO radar for advanced driver-assistance systems and autonomous driving: Advantages and challenges[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(4): 98-117.

- [5] Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1(1): 6–43.
- [6] 李冰, 刘仕奇, 谷鹏举, 等. 适于双站SAR的后向投影高分辨率成像算法[J]. *信息技术*, 2019(2): 39–42.
- [7] Kaina N, Lemoult F, Fink M, et al. Ultra small mode volume defect cavities in spatially ordered and disordered metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(14): 5057–5060.
- [8] Sardellitti S, Barbarossa S. Joint optimization of collaborative sensing and radio resource allocation in small-cell networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(18): 4506–4520.
- [9] 赵博, 黄磊, 周汉飞, 等. 基于单频时变阈值的1-bit SAR成像方法研究[J]. *雷达学报*, 2018, 7(4): 446–454.
- [10] Zhao B, Huang L, Bao W. One-Bit SAR imaging based on single-frequency thresholds[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 7017–7032.
- [11] Zhao B, Huang L, Li J, et al. Deceptive SAR jamming based on 1-bit sampling and time-varying thresholds[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(3): 939–950.
- [12] Li C, He Y, Wang X, et al. Distributed detection of sparse stochastic signals via fusion of 1-bit local likelihood ratios[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2019, 26(12): 1738–1742.
- [13] Han J, Li G, Zhang X P. Refocusing of moving targets based on low-bit quantized SAR Data via parametric quantized iterative hard thresholding[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(3): 2198–2211.
- [14] Han J H, Li G, Wang K P, et al. 1-Bit radar imaging based on adversarial samples[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1–13.
- [15] Collins F A, Sicking C J. Properties of low precision analog-to-digital converters[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1976, AES-12(5): 643–646.

## Analysis of the inter-modulation effect in 1-bit quantization and its influence on radar system

WU Yuezhou<sup>1</sup>, LIU Shiqi<sup>2\*</sup>, WANG Xingyi<sup>1</sup>, LI Bing<sup>3,4</sup>

1. College of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China
2. College of Electronic and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China
4. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China

**Abstract** The rapid development and application of radar technology provide more and more convenient means for acquisition of target information and bring great convenience to the life of residents. At the same time, with the rise of the demand for target information refinement the bandwidth and data volume of radar are also increasing, which limits further application of radar equipment to a certain extent. To solve this problem, 1-bit quantization technology has received more and more attention because of its advantage of reducing the amount of data. However, the highly nonlinear process of 1-bit quantization brings about frequency inter-modulation and greatly complicates signal components, bringing new challenges to radar detection. This paper analyzes this problem and theoretically shows the model of quantization noise. Then, it analyzes how the non-linear effect affects the performance of target detection in the radar system. This gives a good theoretical reference for design of radar system based on 1-bit quantization.

**Keywords** radar; one-bit quantization; inter-modulation; false target ●



(责任编辑 王志敏)