

doi: 10.7690/bgzdh.2021.05.019

基于 SystemVue 的导弹矢量脱靶量测量仿真系统

毕月, 冯玉光

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对矢量导弹脱靶量测量系统设计初期不易于实地、实物试验, 为深入分析该系统性能, 利用 SystemVue 软件进行建模, 建立了面向调频连续波 (frequency modulation continuous wave, FMCW) 导弹矢量脱靶量测量的高效、直观仿真系统。系统对信号生成、MIMO 收发天线、回波信号生成、混频、模数转换、FFT、单元平均类恒虚警算法 (cell averaging-constant false alarm rate, CA-CFAR) 模块进行理论与仿真分析, 并针对模数转换器采样率这一关键参数对系统的影响进行调试对比。结果表明: 在 SystemVue 建立的仿真系统能够实现高效动态的导弹矢量脱靶量测量仿真, 参数调试简便, 结果展示直观, 对于导弹矢量脱靶量测量系统的设计改进具有重要意义。

关键词: 矢量脱靶量; FMCW 雷达; 系统仿真; SystemVue

中图分类号: TJ760.6 **文献标志码:** A

Simulation System for Missile Vector Miss Distance Measurement Based on SystemVue

Bi Yue, Feng Yuguang

(College of Naval Coast Defence, Navay Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the initial design of vector missile miss distance measurement system, it is not easy to carry out field and physical tests. In order to deeply analyze the performance of the system, SystemVue software is used for modeling, and an efficient and intuitive simulation system for frequency modulation continuous wave (FMCW) missile vector miss distance measurement is established. The system conducts theoretical and simulation analysis of signal generation, MIMO transceiver antenna, echo signal generation, mixing, digital-to-analog conversion, FFT, CA-CFAR modules, and focuses on the systems key parameters such as digital-to-analog converter sampling rate. The results of debugging comparison are shown. The results show that the simulation system established in SystemVue can realize efficient and dynamic missile vector miss measurement. The parameter debugging is simple and the results are intuitive. It has great significance for the design improvement of missile vector miss measurement.

Keywords: vector miss distance; FMCW radar; system simulation; SystemVue

0 引言

脱靶量测量方法中^[1-4], 光学技术需要多台设备交汇完成, 前期准备复杂, 数据量多及处理复杂, 且受能见度影响大; 激光雷达由于激光本身的衰减特性, 受环境因素影响大, 且由于波束过窄, 搜索目标较为困难; 脉冲雷达工作功率大, 体型较大、重量较重, 系统较为复杂, 价格昂贵。为推动反舰导弹脱靶量测量技术顺应发展趋势, 将成本较低、体积较小的调频连续波 (FMCW) 雷达技术应用于反舰导弹矢量脱靶量测量, 以提高脱靶量测量精度, 减小体积、减轻重量、降低成本; 但考虑到完全真实的导弹脱靶量测量试验的成本, 以及系统的复杂性, 某一参数的改变即可能对系统性能造成较大影响, 因此在设计初期, 非常有必要建立一套仿真系统进行参数调试、效能评估。

作为一款专门运用在电子系统层级设计的 EDA 软件, SystemVue 的雷达相关工具丰富, 系统功能完善, 可以实现真正的动态系统仿真^[5-8]。该软件拥有全部的逻辑功能, 支持多层子系统, 具有大量可选择的库, 结果显示方式多样, 内嵌 MATLAB, 允许用户插入代码, 满足导弹脱靶量测量系统仿真测试需要。

笔者利用 SystemVue 仿真软件, 结合反舰导弹矢量脱靶量测量实际要求, 对设计的 FMCW 导弹脱靶量测量系统进行仿真建模。通过“理论+仿真”分析, 证实该系统能够基本满足反舰导弹矢量脱靶量测量要求, 并以系统参数中 1 个关键指标 (模数转换器采样率) 的变化对系统的影响为例, 体现了 SystemVue 软件在系统参数调试仿真方面的优越性。

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-19

作者简介: 毕月 (1996—), 女, 山东人, 硕士, 从事兵器综合保障技术研究。E-mail: 1781821295@qq.com。

1 导弹矢量脱靶量测量系统建模

设计的 FMCW 导弹矢量脱靶量测量仿真系统结构框图如图 1^[6]。对于反舰导弹脱靶量测量系统，距离测量范围至少大于 200 m，速度测量范围约大于 850.75 m/s，俯仰角大于 20°。考虑到反舰导弹的毁伤范围以及靶船的大小，对导弹的命中精度要求较为宽松，要求标量距离精度小于 2 m，速度精度小于 5 m/s，角度误差优于 0.1°。为满足导弹矢量脱靶量测量要求，由信号生成器①生成带宽大、时带

积大、时延远小于时宽、不存在距离盲区且分辨率高的三角波调频信号，一路输入混频器④，一路通过功率放大器经 2×1 发射天线②向空间内辐射。信号经导弹目标反射，被 4×1 接收天线③捕获，生成的回波信号输入混频器④与发射信号混频得到 4 路差频信号。对差频信号进行下抽处理，通过模数转换器⑤，对获得的信号进行⑥FFT 处理，其中一路做⑦单元平均类恒虚警算法(CA-CFAR)目标检测，获得的数据通过 MATLAB 处理得到导弹目标的矢量脱靶量信息。具体参数设置如表 1。

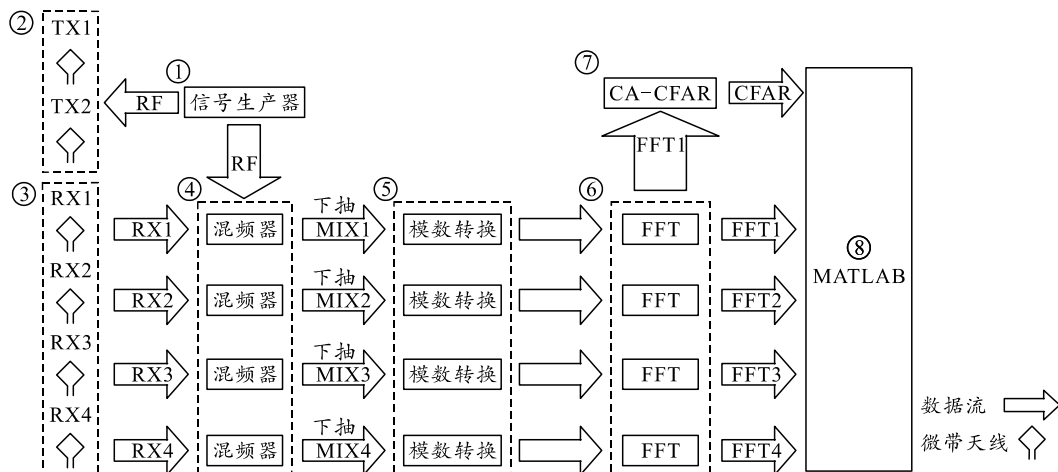


图 1 仿真系统结构框图

表 1 系统参数设置

参数	数值
调频周期 t/ms	2
调频带宽 B/MHz	200
中心频率 f_0/GHz	24
采样频率 SR/MHz	512
发射天线个数(间距)	2×1(2 倍波长)
接收天线个数(间距)	4×1(0.5 倍波长)
模数转换器采样率 ADCFs/MHz	6.4
FFT 采样点数	12 800
Pf	$10e^{-4}$

1.1 场景设计

笔者假设在靶船中心架设 FMCW 导弹脱靶量测量雷达。如图 2 所示，以靶船上的雷达为原点，以正东为 x 轴，根据右手定则建立 3 维直角坐标系 E^3 (正北为 y 轴，东北天坐标系)。

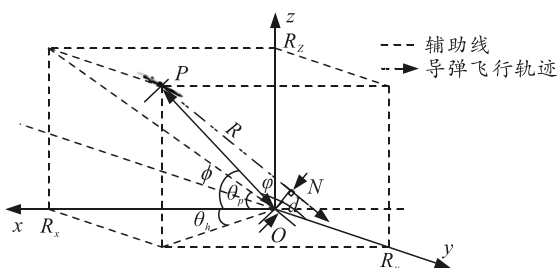


图 2 雷达天线坐标系

假设在 $t=t_0$ 时，雷达捕捉到做匀速直线运动到点 P 的导弹目标(运动轨迹即速度方向 \vec{v} 如图 2 中带箭头的虚线所示)，此时导弹的位置表示为 $[R_x \ R_y \ R_z]$ 。从 t_0 时开始，记录测量到的导弹矢量坐标，直到导弹爆炸。图中，导弹运动到点 N 时，距离 ON 即为弹与雷达的最小距离， $\overline{ON} = [x \ y \ z]$ 即为要测量的矢量脱靶量。

1.2 信号生成模块建模

搭建的信号生成模块如图 3^[7]。

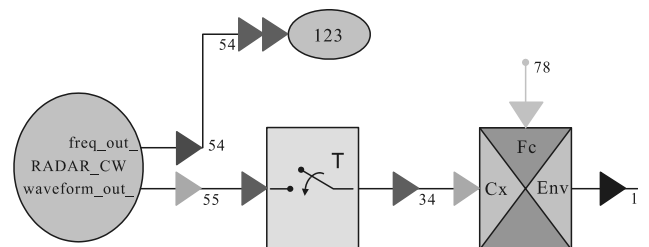


图 3 信号生成模块

以一个周期内的信号为例，对通过该模块的信号建模：生成的三角波调频信号的每个周期由正斜率调频区间和负斜率调频区间构成，假设射频信号的调制频率为

$$f_T(t) = \begin{cases} f_0 - B/2 + (2B/T)t, 0 \leq t < T/2 \\ f_0 + 3B/2 - (2B/T)t, T/2 \leq t < T \end{cases} \quad (1)$$

其中 f_0 为信号的中心频率。

根据调频连续波的性质，射频信号的表达式为

$$S_T(t) = \begin{cases} A_0 \cos \left[2\pi \left(f_0 t - \frac{B}{2} t + B \frac{t^2}{T} \right) \right], 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ A_0 \cos \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{3B}{2} t - B \frac{t^2}{T} \right) \right], \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (2)$$

其中 A_0 为射频信号幅度。

采样后离散信号可用式(3)表示：

$$S_T(N) = \begin{cases} A_0 \cos \left[2\pi \left(f_0 N - \frac{B}{2} N + B \frac{N^2}{T} \right) \right], 0 \leq N < \frac{T}{2} \\ A_0 \cos \left[2\pi \left(f_0 N + \frac{3B}{2} N - B \frac{N^2}{T} \right) \right], \frac{T}{2} \leq N < T \end{cases} \quad (3)$$

其中， $N=(1/SR)n, n=1,2,\dots$ 。

1.3 天线模块建模

采用 2×4 微带天线阵列设计，通过电磁波空间相互干涉，提高天线模块功率容量，增大测角范围^[9-11]。仿真系统的发射天线、回波生成、接收天线模块具体设计如图 4。

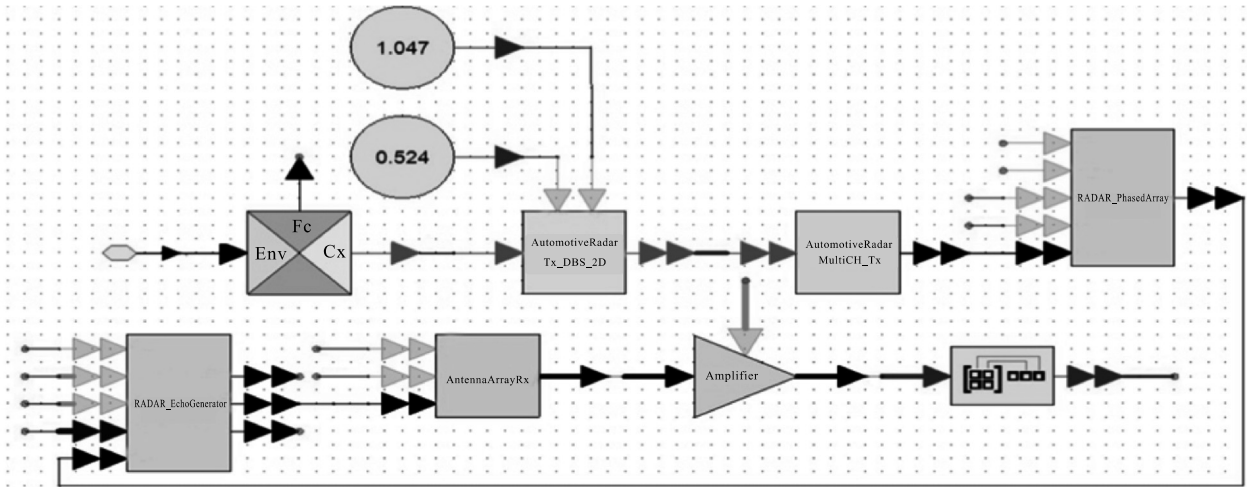


图 4 发射天线、回波生成、接收天线模块

假设接收天线每间距 0.5 倍波长，接收信号的相位差为 ω 。则对于某一时刻的导弹目标，发射天线 TX1 发射的信号表达式可以表示为

$$S_{T_i}(N) = \begin{cases} A_0 \cos \left[2\pi \left(f_0 N - \frac{B}{2} N + B \frac{N^2}{T} \right) \right], 0 \leq N < \frac{T}{2} \\ A_0 \cos \left[2\pi \left(f_0 N + \frac{3B}{2} N - B \frac{N^2}{T} \right) \right], \frac{T}{2} \leq N < T \end{cases} \quad (4)$$

经过该时刻的导弹目标反射，根据三角波调频的性质，接收天线捕获的回波信号的调制频率可以表示为

$$f_R(N) = f_T(N - \tau) + f_d = \begin{cases} f_0 - \frac{B}{2} + 2B \frac{N - \tau}{T} + f_d, \tau \leq N < \frac{T}{2} \\ f_0 + \frac{3B}{2} - 2B \frac{N - \tau}{T} + f_d, \frac{T}{2} \leq N < T \end{cases} \quad (5)$$

其中 $f_d = 2fv/c$ 为接收信号和发射信号之间的多普勒频差。则接收天线阵列接收到的该发射信号的回波信号可以表示为

$$S_{R_i}(N) = \begin{cases} \eta A_0 \cos \left\{ 2\pi \left[\left(f_0 - B/2 + f_d \right) (N - \tau) + B(N - \tau)^2 / T \right] + (i-1)\omega \right\}, \tau \leq N < T/2 \\ \eta A_0 \cos \left\{ 2\pi \left(f_0 + 3B/2 + f_d \right) (N - \tau) - B(N - \tau)^2 / T \right] + (i-1)\omega \right\}, T/2 \leq N < T \end{cases}, i = 1, 2, 3, 4. \quad (6)$$

其中 η 为回波衰减系数。

1.4 混频模块建模

仿真系统其中一路混频模块具体设计如图 5。

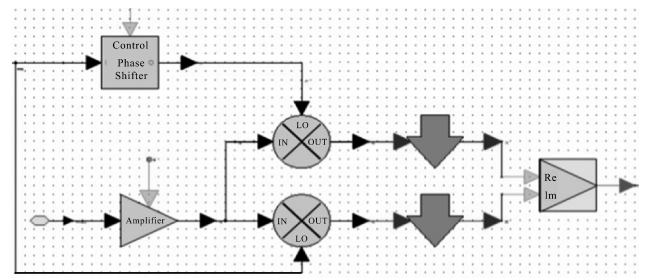


图 5 混频模块

以其中一路接收信号为例，经过混频器混频的差频信号可以表示为

$$S_B = \begin{cases} \gamma A_0^2 \cos\{2\pi[(f_0 - B/2 + f_d)\tau - f_d N + 2B\tau N/T - B\tau^2/T]\}, \tau \leq N < T/2 \\ \gamma A_0^2 \cos\{2\pi[(f_0 + 3B/2 + f_d)\tau + f_d N + 2B\tau N/T + B\tau^2/T]\}, T/2 \leq N < T \end{cases} \quad (7)$$

其中 γ 为系统增益。考虑到 $\tau \ll T$ ，式中 $\tau^2/T \approx 0$ ，将上式作归一化处理，可以得到

$$S'_B = \begin{cases} \cos\{2\pi[(f_0 - B/2 + f_d)\tau - f_d N + 2B\tau N/T]\}, \tau \leq N < T/2 \\ \cos\{2\pi[(f_0 + 3B/2 + f_d)\tau + f_d N + 2B\tau N/T]\}, T/2 \leq N < T \end{cases} \quad (8)$$

由于模数转换器以及 FFT 的数据处理能力限制，为减小 ADC 及 FFT 模块计算压力，提高系统计算速度，对混频后获得的差频信号进行下抽处

理^[12-13]。根据表 1 的参数设置，压缩后的信号数据量为原来的 1/80。下抽处理后的混频信号可以表示为

$$S''_B = \begin{cases} \cos\{2\pi[(f_0 - B/2 + f_d)\tau + (2B\tau/T - f_d)K]\}, \tau \leq K < T/2 \\ \cos\{2\pi[(f_0 + 3B/2 + f_d)\tau + (2B\tau/T + f_d)K]\}, T/2 \leq K < T \end{cases}, K = 80N. \quad (9)$$

1.5 FFT 模块建模

将下抽后的差频信号作 FFT 处理即可得到该差频信号的功率谱：

设

$$\omega_B = \begin{cases} \omega_{B^+} = 2\pi(f_b - f_d) = 2\pi\left(2\tau\frac{B}{T} - f_d\right), \tau \leq t < T/2 \\ \omega_{B^-} = 2\pi(f_b + f_d) = 2\pi\left(2\tau\frac{B}{T} + f_d\right), T/2 \leq t < T \end{cases},$$

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_{B^+} = 2\pi(f_0 - B/2 + f_d)\tau, \tau \leq K < T/2 \\ \varphi_{B^-} = 2\pi(f_0 + 3B/2 + f_d)\tau, T/2 \leq K < T \end{cases}.$$

将参数 ω_B 、 φ 代入式(9)中，可以得到

$$S_B(K) = \cos(\omega_B K + \varphi), \tau \leq K < T. \quad (10)$$

设，当 $\tau \leq K < T$ 时，

$$S(K) = S_B(K)W(K). \quad (11)$$

其中 $W(K) = U(K) - U(K - T)$ ， $U(K)$ 为阶跃函数。

由于 $S_B(K)$ 与 $W(K)$ 是相互独立的信号，故其自相关函数的关系为

$$R(\tau) = R_{S_B}(\tau)R_W(\tau). \quad (12)$$

相应的频谱关系为

$$P(\omega) = 1/(2\pi) \times P_{S_B}(\omega) \times P_W(\omega). \quad (13)$$

其中 $S_B(t)$ 与 $W(t)$ 的功率谱分别为

$$P_{S_B}(\omega) = 2\pi[\delta(\omega - \omega_B) + \delta(\omega + \omega_B)]; \quad (14)$$

$$P_W(\omega) = T^2[Sa^2(\omega - \omega_B)T/2 + Sa^2(\omega + \omega_B)T/2]. \quad (15)$$

由于功率谱的正负部分对称，因此计算时可以省去 $(\omega + \omega_B)$ 的部分^[14]。因此得到的 $S(t)$ 的功率谱可以表示为

$$P(\omega) = T^2 Sa^2[(\omega - \omega_B)T/2]. \quad (16)$$

可以看出 $P(\omega)$ 在 $\tau \leq K < T/2$ 有峰值 $\omega = \omega_{B^+}$ ，在 $T/2 \leq K < T$ 有峰值 $\omega = \omega_{B^-}$ 。

1.6 CA-CFAR 虚警模块

相比 CA-CFAR 算法^[15]，GO(最大选择恒虚警)、SO(最小选择恒虚警)的参考单元长度只有一半，取样不够充分；OS-CFAR(有序统计恒虚警)计算量和实现难度更大^[16]。综合考虑估计的准确性与计算量的大小，选取 CA-CFAR 作为系统的目标检测估计算法。

根据计算可知，通过该模块得到的 2 个峰值点 $(x(1), x(2))$ 与系统各参数的关系为

$$\text{ADCfs}/\text{FFTSize} = f_{b^{(-)}}/x(1(2)). \quad (17)$$

式中 f_{b^+} 、 f_{b^-} 即对应 1.5 节中的功率谱峰值 ω_{B^+} 、 ω_{B^-} 。

2 仿真系统结果分析

为判断设计的 FMCW 导弹矢量脱靶量测量系统的性能能否达到要求，解算一个距离靶船 200 m 左右、速度 850.75 m/s 左右的导弹目标在这一时刻的矢量位置信息。假设有一个 RCS 为 0.5 的导弹目标正以 [744 124 391] 的速度向着靶船移动，在 t 时刻，导弹目标运动到 [174 30 95] 的位置。运行仿真系统，通过 SINK 元件在需要的节点上收集数据，解算这一时刻的导弹矢量位置信息。

2.1 差频信号仿真

接收天线 RX1 与射频信号混频后得到的差频信号 (MIX1) 在一周期内的仿真结果如图 6。

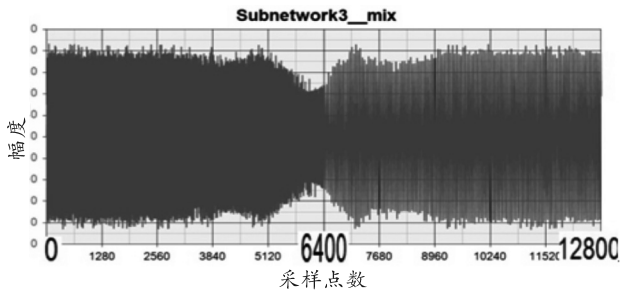


图 6 差频信号仿真结果

从仿真结果可以看出，12 800 ($ADCFS \times T$) 个采样点正好实现了完整的一周期采样，与表 1 的设置吻合。混频得到的差频信号具有很明显的梯形调频特性，在一周期内可以明显看出，前半周期 (0—6 400) 有一个主要频率值，后半周期 (6 400—12 800) 有一个主要频率值，对应 1.5 节中信号分析结果功率谱峰值 ω_{B^+} ， ω_{B^-} 。

2.2 CA-CFAR 模块信号仿真

接收天线 RX1 与射频信号混频后的差频信号，经下抽、模数转换、FFT 处理后的信号 (FFT1) 经过 CA-CFAR 目标检测估计的仿真结果如图 7。

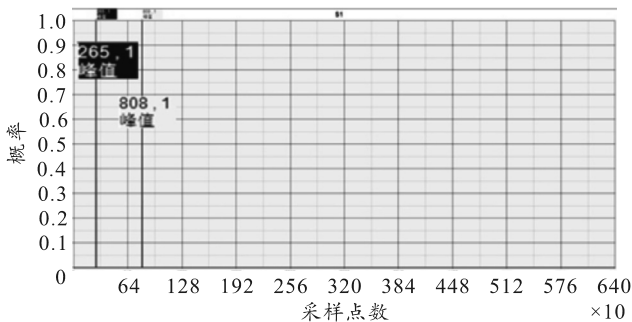


图 7 CA-CFAR 模块仿真结果

由上图可以看出虚警处理后得到 2 个明显的峰值点，即 1.6 节中提到的 $x(1)$ 、 $x(2)$ 。仿真结果数值代入式 (17)，通过计算可以得出 $f_{b^+}=132.5$ kHz， $f_{b^-}=404$ kHz。

2.3 数据处理结果

目标检测估计后的结果 CFAR 与四路 FFT 处理后的结果 FFT (1-4) 以端口速度 12 800 (FFTSize) 输入 MATLAB，通过一段程序求解导弹矢量脱靶量信息^[17]。为更直观地评估 FMCW 导弹矢量脱靶量测量仿真系统的测量精度等性能，输出假设的 t 时刻导弹矢量位置信息测量结果如图 8。

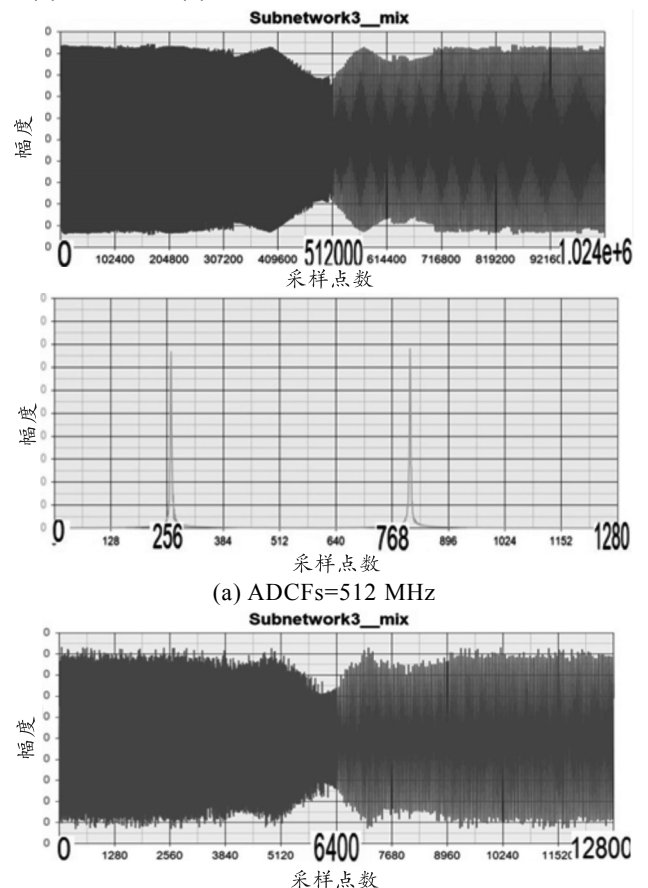
索引	angle	range	velocity
1	29.517	201.583	848.438

图 8 数据处理结果

对比仿真结果发现，FMCW 导弹矢量脱靶量测量系统能够捕获到距离 200 m、速度约大于 850.75 m/s、俯仰角大于 20° 的导弹目标，且解算的导弹目标在 t 时刻的矢量位置信息与设置的笛卡尔坐标系下的位置、速度信息存在的距离误差优于 1.5 m，速度误差优于 2 m/s，角度误差优于 0.01°，能够满足反舰导弹矢量脱靶量测量要求。

2.4 ADCFs 对系统的影响

理论上，模数转换器采样频率越大，结果与原图像越接近；但对于导弹脱靶量测量系统，测距范围远，时延大，调制周期大，且导弹运动速度大的情况，模数转换器接收的数据量过大。若不考虑元件数据容量，一味增大采样频率，虽然精度得到保证，但牺牲了运算速度，甚至可能导致系统卡顿、死机。以模数转换器采样率 $ADCFS=SR=512$ MHz、 $ADCFS=6.4$ MHz 及 $ADCFS=0.08$ MHz 为例，在其他条件相同的情况下，通过对比 ADCFs 不同时，系统 (第一路信号) 混频后获得的差频信号以及 FFT 处理后的信号图像如图 9，更直观地展示模数转换器采样频率的变化对导弹脱靶测量的影响。在 FFT 处理后的信号图像中，Y 轴最大值分别为图 (a) $4e^{-18}$ 、图 (a) $4e^{-20}$ 、图 (a) $4e^{-21}$ 。



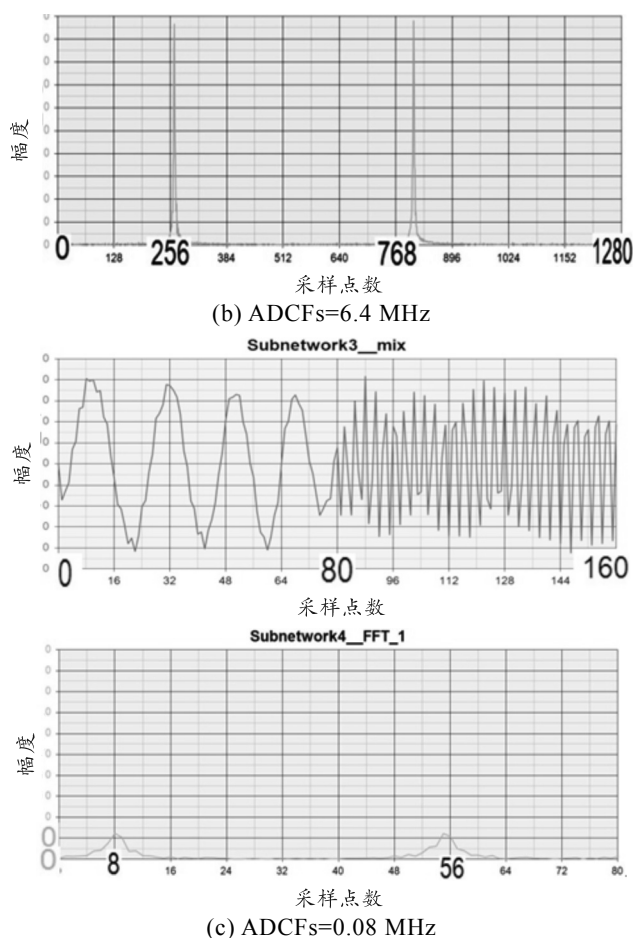


图9 差频信号及FFT处理结果

从上图可以明显看出：采样频率越小，差频信号图形失真越明显，FFT处理后的结果幅值越小；采样频率越大，一周期内需处理的数据就越多，系统数据处理压力越大。需均衡考量这2方面，选取最合适的参数值。

3 结论

笔者针对设计初期的导弹脱靶量测量系统不适用于实地、实物试验的问题，利用系统仿真平台 SystemVue 对设计的 FMCW 导弹脱靶量测量系统进行建模仿真。通过对信号生成模块、天线模块、混频模块、FFT 模块、CA-CFAR 模块的具体建模与 MATLAB 程序设计，得到一系列信号仿真结果，并与理论分析结果进行对比分析。结果表明，该 FMCW 导弹脱靶量测量系统具备远距、高速测量能力，能够基本满足导弹脱靶量测量的硬性要求；对系统参数中模数转换采样频率这一重要变量的变化对系统的影响进行了对比分析，同时证明了该仿真系统具备模拟 FMCW 雷达导弹矢量脱靶量测量系统的能力，能够实现便捷的参数调试、增加系统噪

声环境等操作，为导弹脱靶量测量系统方案设计验证提供了方便高效的仿真平台，为改进当前导弹脱靶量测量技术、将 FMCW 导弹脱靶量测量雷达系统广泛应用于导弹脱靶量测量实践具有重要意义。

参考文献：

- [1] 贺星辰. FMCW 近程测距雷达的差频信号处理技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [2] 侯盼卫. FMCW 测距雷达的信号处理技术与实现[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [3] 刘军辉, 陈宏滨. 基于 FMCW 雷达测距的车辆防撞系统[J]. 桂林电子科技大学学报, 2016, 36(5): 349-354.
- [4] WON Y S, SHIN D, PARK M, et al. 24 GHz FMCW Radar Module for Pedestrian Detection in Crosswalks[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2019, E102.C(5): 416-419.
- [5] 赵杨, 尚朝轩, 韩壮志. SystemVue 在雷达系统仿真中的应用[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(1): 73-77.
- [6] 焦安霞. 基于 SystemVue 汽车雷达系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(4): 111-114.
- [7] 尹园威, 刘月航. 三坐标 DBF 雷达 SystemVue 仿真建模方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11): 197-201.
- [8] 张杰, 何强, 韩壮志. 基于 SystemVue 的某型雷达发射信号生成[J]. 现代电子技术, 2014, 37(21): 45-48.
- [9] XU L, YUAN C W, ZHANG Q, et al. An aperture coupled microstrip antenna array for high power microwave application[J]. Rev Sci Instrum, 2019, 90(9): 94704.
- [10] SHARMA S, SHARMA S, MAINUDDIN, et al. Design of 4-element microstrip array of wideband reflector antenna with stable high gain characteristics[J]. Microsystem Technologies, 2019, 25(8): 3193-3201.
- [11] 郭婧. K 波段微带阵列天线技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [12] 王明刚. 24 GHz 调频连续波雷达信号处理技术应用[J]. 电子技术与软件工程, 2018(15): 71-72.
- [13] 赵瑞娟. 基于 FMCW 雷达的差频信号采集系统设计[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(6): 83-85.
- [14] 王飞. 24 GHz 车载雷达信号处理算法的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- [15] 付炎松. 24 GHz 汽车防撞雷达设计及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [16] 关键, 黄勇. 一种简便的 MIMO 阵列雷达 CFAR 检测器[J]. 信号处理, 2010, 26(3): 467-472.
- [17] 张志国, 王召刚, 王红萍. 事后数据处理中的反舰导弹脱靶量估算方法研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(8): 157-160.