2019 年 12 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2019)06-0994-06

基于 FEKO 的频率步进导引头回波仿真

庞维建,李志强,刘洪全,同志强,杨国胜

(北京航空工程技术研究中心,北京 100076)

摘 要:频率步进雷达(SFR)导引头通过在频域进行带宽合成,距离分辨力显著提高,可以分辨出复杂目标的细节特征,从而进行抗干扰分析与目标识别。在进行 SFR 回波信号仿真时,要求 回波模型能符合并反映目标的细节特征,目标不能等效为点目标,而散射中心提取法则意味着散 射点的舍弃和合并,对目标的细节描述并不准确,为此提出基于 FEKO 的复杂目标回波信号产生方 法。根据频率步进雷达信号时域特征,推导出直接利用 FEKO 的散射场数据进行时域回波计算的数 学模型,并使用 FEKO 提取目标在各种入射角度下的散射场幅度和相位信息进行存储,在仿真时直 接调用散射场数据进行时域回波计算,从而得到复杂目标的高拟真度回波信号模型,在空空导弹 数字仿真、半实物仿真和抗干扰研究中具有实用意义。

Simulation of stepped-frequency radar echo based on FEKO

PANG Weijian, LI Zhiqiang, LIU Hongquan, TONG Zhiqiang, YANG Guosheng (Beijing Aviation Engineering Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: By synthesizing bandwidth in the frequency domain, the distance resolution of Stepped Frequency Radar(SFR) seeker can distinguish the detailed features of complex targets, so as to conduct anti-interference and target identification. When implementing SFR echo simulations, echo model are required to accord with the targets on detailed features, and the target is no longer point target. Nevertheless, using the scattering center extraction means some of the scattering points are discarded and merged, and the detailed description of the target is not accurate. Therefore, a method of generating complex target echo model based on FEKO is proposed, according to the time domain characteristics of the SFR signal, time domain echo model using the scattering data based on FEKO is deduced. In addition, FEKO is utilized to extract the scattering field amplitude and phase information of the target at various incident angles and the information is stored in database. When simulation is implemented, time domain echo model of complex target can be obtained. This method for echo modeling has practical value in air-to-air missile digital simulation, hardware-in-loop simulation and anti-jamming research.

Keywords: FEKO; frequency step; echo modeling; scattering characteristics

目标回波特性建模是空空导弹数字仿真中的重要一环,传统脉冲多普勒体制的导引头距离分辨力低,空中目标可以等效为单点目标进行回波仿真。频率步进雷达信号具有较宽的信号带宽,是一种距离高分辨力信号^[1],可以分辨出目标的细节特征,从而进行目标识别与分析,这时目标就不能简单地等效为单个散射点。鉴于此,可以通过实测的方法,确定目标在不同角度、不同频点上的散射场,提取目标的散射中心进行目标回波信号的仿真。

实测方法时间长,设备复杂,费用高,而且有些目标并不能获得实体模型来进行散射系数的测量,利用计算 电磁学方法计算目标的散射特性成为一种选择。FEKO 电磁计算软件(FEKO 缩写词源于德语,意为任意表面物体 的场计算)支持任意表面物体的散射场计算,集成了多种常用电磁计算方法,如矩量法(Method Of Moments, MOM)、有限元法(Finite Element Method, FEM)、多层快速多极子(Multi-Level Fast Multipole Method, MLFMM), 及物理光学法(Physical Optics, PO)、大面元物理光学法(Large element PO)、几何光学法(Geometrical Optics, GO),

几何绕射法(Geometrical Theory of Diffraction, GTD)等高频计算方法,可以根据目标电尺寸、仿真时间和精确度 等因素选择合适的计算方法^[2-6]。使用 FEKO 可以完成目标的静态雷达散射截面积分析、散射系数计算,或利用 其数据获取一维距离像^[7],可以用作散射中心提取的辅助手段。本文通过 FEKO 建立目标的几何模型,获取其在 不同角度上散射场的相位和幅值数据进行存储,此散射场数据为目标所有散射场的叠加,可以更真实地反映目标 的电磁特征。同时,通过分析 SFR 回波信号时域特征,推导出直接利用 FEKO 的散射场数据进行时域回波计算 的数学模型。在导弹数字仿真的目标回波仿真环节,根据导弹和目标的实时位置调用相应散射场数据,对目标在 快时间域和慢时间域的运动特征进行精确仿真,从而得到目标回波时域仿真信号。

1 SFR 回波信号表示方法

SFR 信号每个重复周期信号频率不变,下个周期的信 号频率步进,具有与线性调频信号类似的大时宽带宽积特 性, 而在硬件实现上则相对容易, 在应用领域得到广泛的 关注^[8-11]。SFR 导引头发射信号特性如图 1 所示, SFR 信 号每个脉冲的宽度和间隔周期一致,但是脉冲内载频的频 率按固定的频率间隔 Δf 从起始频率 f_0 开始步进,频率步 进个数通常为有限个,如步进 N个脉冲后脉冲载频重新从 f。开始步进。

SFR 发射信号可以通过式(1)描述:



图 1 SFR 发射信号特性

$$s_{t}(t,n) = A_{n}\operatorname{rect}\left(\left(t - nT_{r} - T_{p}/2\right)/T_{p}\right)\exp(-j2\pi f_{n}t)$$
(1)

式中: A_n 为第n个 SFR 信号发射脉冲的幅度; T_r 为重复周期; T_p 为发射脉冲宽度; $f_n=f_0+\Delta f$ 为第n个 SFR 信号 的频率, f₀为步进频率的起始频率。

距离 R₀处的点目标回波时间延迟为:

$$\tau(n) = 2(R_0 + v(n-1)T_r + vt) / c$$
(2)

式中:v为弹目相对速度;c为光速。 则回波信号可以表示为:

$$s_{r}(t,n) = B_{n} \operatorname{rect}\left((t - nT_{r} - T_{p}/2 - \tau(n))/T_{p}\right) \exp\left\{-j2\pi f_{n}(t - \tau(n))\right\}$$
(3)

式中 B, 为回波信号的幅度。

经过混频并滤除高频分量后的回波可以表示为:

$$s_{\rm r}(t,n) = B_n \operatorname{rect}\left((t - nT_{\rm r} - T_{\rm p}/2 - \tau(n))/T_{\rm p}\right) \exp\left(j2\pi f_n \tau(n)\right) \tag{4}$$

将式(2)代入并分解为以下两式相乘:

$$s_{r,l}(n) = \exp(j4\pi f_n R_0/c)$$
(5)

$$s_{r,2}(t,n) = B_n \operatorname{rect}\left((t - nT_r - T_p/2 - \tau(n))/T_p\right) \exp\left\{j4\pi f_n \left[v(n-1)T_r + vt\right]/c\right\}$$
(6)

当目标为复杂目标时, 散射点就会有多个, 假设散射点个数为 M, s, (n) 改写为:

$$s_{r,1}(n) = \sum_{m=1}^{M} \exp(j4\pi f_n R_m/c)$$
⁽⁷⁾

s.(n)为复杂目标的频域响应序列,其中包含了复杂目标各部分对散射场的相位和幅度的调制。通过 FEKO 获得的就是这一部分信号特性,并且 FEKO 计算出的散射场为目标各部分所有散射场的叠加。 s,,(t,n)中包含了 目标的多普勒信息,将 FEKO 获得 $s_{r_1}(n)$ 序列与 $s_{r_2}(t,n)$ 对应相乘即得到了时域 SFR 回波信号。

目标建模与 SFR 时域信号仿真 2

PO 法是用散射体表面的感应电流代替散射体本身作为散射场的源,然后对表面感应电流积分而求得散射场。 由于导引头通常工作在 X 波段以上频段,相对来说目标的电尺寸较大,即使使用 PO 这种高频计算方法,目标网 格数量也会急剧增长。大面元物理光学法对传统 PO 法的基函数进行修正,允许以波长相当甚至几个波长的尺度 剖分目标,大大降低了目标的网格数量,在保证准确度的前提下,速度更快^[4]。

2.1 目标三维模型的建立与网格剖分

以图 2 建立的近似飞机目标为例。其外形参数为:长度 10 m, 直径 1 m, 翼展 5 m。利用 FEKO 自动剖分工具进行目标的网格剖 分,三角面元边长设置为 0.02,其他设置采用默认设置。剖分三 角面元总数为 400 941。FEKO 自身的 CAD 功能有限,但是支持导 入 CATIA、Parasolid等三维建模软件的模型,也可导入由 hypermesh 优化剖分的网格,从而支持更复杂目标的建模和网格优化。





2.2 参数设置

网格剖分完成后,在网格的"mesh properties"选项卡中设置计算方式为"Large Element PO-only illuminated from front"。表示 FEKO 中只进行一阶 PO 计算。然后设置仿真频率为线性步进频率,频率范围为 17~17.5 GHz,频率步进个数为 64。设置入射波为平面波,电场强度为 1 V/m,入射波的位置可以在 θ =0~180°, φ =0~360°范围内 任意设置(以目标头部方向为 X 轴,背部方向为 Z 轴, θ 和 φ 分别为入射点与 Z 轴和 X 轴的夹角),本文选择 4 个入射点(θ :60°,80°; φ :0°,30°)获取目标的频域响应序列并进行仿真分析。在"request"中选择获取目标的远场特性,然后在"FarField"的"properties"选项卡中设置测量点与入射波位置一致并在"Advanced"选项卡中勾选"Export fields to ACII file(*.ffe)",保证计算结果保存到.ffe 文件中。

2.3 仿真结果与一维距离像分析

完成上述设置后,通过"CEM validate"检查仿真参数设置和网格剖分是否符合计算要求,检查无误后可以 开始仿真。仿真结束后输出的.ffe 文件中包含了目标在各入射点的散射电场 E(n)。目标频域响应序列 $s_{r,l}(n)$ 与 E(n)的对应关系为:

$$s_{r1}(n) = \operatorname{Re}(\boldsymbol{E}(n)) + \operatorname{jIm}(\boldsymbol{E}(n))$$
(8)

对 FEKO 计算出的目标频域响应序列进行 IFFT 变换即为目标的一维距离像,如图 3 所示,可见目标在不同 入射角度下散射点的相对位置和幅度都会有较大差别,尤其是尾翼部分的散射强度随 θ 变化剧烈。



Fig.3 Range profile of target in four different incident angels 图 3 四个人射角度上的目标一维距离像

2.4 复杂目标的时域回波生成与特性分析

在空空导弹仿真系统中,通过 FEKO 得 到的目标在不同入射角的频域响应序列以数 据库的形式存储。回波产生模块根据电磁波入 射角度和频率,调用相应的序列生成目标时域 回波,如图 4 所示。

假设目标速度为-245 m/s,导弹速度为 1 100 m/s。目标导弹相对距离 2.7 km,相对 高度-500 m。信号重复频率为 1 MHz,脉冲



宽度为 0.1 μs,积累帧数为 64 帧。频率步进雷达接收机对目标回波进行脉冲压缩、数据抽取和相参积累后可以 得到目标的距离--速度二维像,如图 5 所示。可见,目标图像不再是一个亮点,而是在距离上的分布随目标姿态 的变化,强弱和相对位置都会有变化的一列亮点。





Fig.5 Range-velocity target images 图 5 目标距离-速度二维像

2.5 距离像在慢时间域上的运动

SFR 信号等效于目标在快时间域和慢时间域的采样。 FEKO 获得的频域响应序列对应于同一距离门时刻不同步 进频数的采样序列,对一个采样矩阵进行数据抽取和距离拼 接就得到了目标在距离门范围内的一维距离像[12-14]。64 个 频率步进脉冲信号经过运动补偿后组成一帧完整的二维回 波矩阵,此矩阵一个维度为频率步进,另一个维度为时间延 迟,在频率步进方向进行 IFFT 变换,则矩阵的 2 个维度上 都代表时间延迟,即2个距离维度,可以称为慢时间域和快 时间域^[15]。由于目标的运动,真实回波位置不仅在快时间域 上移动而且会在慢时间域上移动,通过使用特定尺寸的抽取 窗口对二维回波矩阵进行抽取,就可以得到目标的一维距离 像,如图 6(a)所示。而通过 FEKO 得到的频域响应序列是一 组静态测量序列,直接使用 s_r(n) 生成的回波矩阵经过 IFFT 后,回波位置在慢时间域居中,没有移动属性,生成的信号 在抽取和拼接时会发生像分裂现象,如图 6(b)~(c)所示。为 了描述目标在慢时间域上的移动,对 s_r(n)进行如下改造:

 $s_{r,1}(n) = s_{r,1}(n) \exp\{-j2\pi f_n([mod(N_{mov}, N) - N/2]/(N\Delta f))\}$ (9) 式中 $N_{mov} = floor(R_t / [c/(2N\Delta f)]), R_t$ 为目标质心与导弹的距 离。增加的部分 exp $\{-j2\pi f_n([mod(N_{mov}, N) - N/2]/(N\Delta f))\}$ 即描 述了目标在慢时间域上移动时回波的相位变化。

经过处理后,回波信号经过 IFFT 后的回波点具备了在 快时间域和慢时间域上移动的属性。

2.6 SFR 信号参数设计

SFR 信号的参数必须进行合理的设计,包括发射脉冲宽



(10)

度 T_p 、频率步进阶梯 Δf 、脉冲个数 N、采样频率 f_s 和重复周期 $T_r^{[16-18]}$ 。其中,脉冲个数 N 是最灵活的参数,增大 N,提高了系统总带宽和脉冲积累数,可以提高系统分辨力,但积累时间变长对信号处理提出了更高的要求。发射脉冲宽度 T_p 和频率步进阶梯 Δf 也是参数设计中必须考虑的重要因素,对每个子脉冲,距离分辨力可表示为:

 ΛR

$$= cT_{\rm p}/2$$

对回波信号进行频域 IFFT 处理时,最大不模糊距离窗表示为:

$$R_{\rm w} = c / \left(2\Delta f\right) \tag{11}$$

从式(11)中可知, Δf 与最大不模糊距离窗有关,在确定 Δf 值时,要充分考虑目标的尺寸。最大不模糊距离 窗应大于目标一维距离像的尺寸,否则目标的距离像就会在慢时间域上折叠在一起,造成系统无法正确识别目标。 距离分辨力与最大不模糊距离窗之间的关系可以表示为:

$$\Delta R/R_{\rm w} = \left(cT_{\rm p}/2\right) / \left(c/(2\Delta f)\right) = T_{\rm p} \Delta f \tag{12}$$

当 $T_p\Delta f > 1$ 时,目标回波脉冲分布在不同的距离窗内,则回波信号在快时间域内冗余,这样可能造成距离像的重绕,在抽取生成一维距离像时会出现伪像,如图 7(a)所示,造成系统误判; $T_p\Delta f = 1$ 时为临界状态,理论上不会出现伪像,如图 6(a)所示,但在系统不稳定的情况下,也可能会对成像造成影响;当 $T_p\Delta f < 1$ 时,目标回波脉冲分布在一个距离窗内,目标距离像不会出现伪像。图 7(b)为脉冲宽度过大导致数据冗余而造成距—速二维平面上出现伪像的情况。因此,SFR 信号参数设计的顺序为:首先根据系统需要达到的距离分辨力确定 T_p ,再根据 $T_p\Delta f \leq 1$ 的关系和目标的尺寸确定 Δf ,然后再根据分辨力和 Δf 确定频率步进个数 N,最后确定采样率 f_s 和重复周期 T_r 。



3 结论

随着信号处理技术和电子器件制造水平的不断进步,新技术不断进入应用领域,SFR 信号作为一种新的信号体制,在空空导弹领域的应用潜力逐渐实现,可以使导引头对目标特性的获取能力显著增强。因此,在进行 SFR 信号仿真时将目标特性简单地描述为一个或几个散射中心点的复合已经不能适应仿真的需求。本文介绍的基于 FEKO 的复杂目标 SFR 时域回波信号仿真方法,根据 SFR 时域信号特征,推导出直接利用 FEKO 仿真数据进行时域回波计算的数学模型,使用 FEKO 获取复杂目标的散射场特征并存储到数据库中,在仿真中直接利用 FEKO 散射场数据进行时域仿真回波的计算,既可以更加精确地描述空空导弹目标及环境特征,又兼顾了仿真实时性, 缩短了回波计算时间,在空空导弹数字仿真、半实物仿真和抗干扰研究中具有一定的实践应用意义。

参考文献:

- [1] 毛二可,龙腾,韩月秋. 频率步进雷达数字信号处理[J]. 航空学报, 2001(22):16-24. (MAO Erke,LONG Teng,HAN Qiuyue. Digital signal processing of stepped frequency radar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001(22):16-24.)
- [2] 黄亚林,张晨新,刘凯越,等. 基于动态 RCS 的隐身目标检测研究[J]. 微波学报, 2017(1):58-62. (HUANG Yalin, ZHANG Chenxin,LIU Kaiyue, et al. A study on detection of stealth target based on dynamic RCS[J]. Journal of Microwaves, 2017(1):58-62.)
- [3] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1985. (WANG Maoguang. Geometric theory of diffraction[M]. Xi'an, China: Xidian University Press, 1985.)

- [4] 王晨,刘梅林,焦金龙. 基于大面元物理光学法的超电大尺寸求解技术[J]. 微波学报, 2012(2):102-105. (WANG Chen,LIU Meilin,JIAO Jinlong. Super electrically large size simulation techniques with large element physical optics[J]. Journal of Microwaves, 2012(2):102-105.)
- [5] 马聪慧,文贡坚,刘晓明,等. 散射中心提取方法研究[J]. 信息技术, 2012(6):176-179. (MA Conghui,WEN Gongjian, LIU Xiaoming, et al. Research on scattering center extraction[J]. Information Technology, 2012(6):176-179.)
- [6] 钟金荣. 目标三维电磁散射参数化模型反演方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2016. (ZHONG Jinrong. Inverse methods for three dimensional parametric scattering model of target[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2016.)
- [7] 帅玮祎,王晓丹,薛爱军. 基于 FEKO 软件的全极化一维距离像仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2014,34(5):173-175.
 (SHUAI Weiyi,WANG Xiaodan,XUE Aijun. Simulation of complete polarized range resolution profile based on FEKO[J]. Journal of Projectiles,Rockets,Missiles and Guidance, 2014,34(5):173-175.)
- [8] 孙玉雪,罗迎,张群,等. 基于线性调频步进信号的空间自旋目标时变三维成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(1):23-31. (SUN Yuxue,LUO Ying,ZHANG Qun, et al. Time-varying three dimensional imaging for space rotating targets with stepped-frequency chirp signal[J]. System Engineering and Electronics, 2018,40(1):23-31.)
- [9] 谢矿生. 基于回波数据压缩的 MIMO-SAR 成像方法[J]. 电讯技术, 2015,55(3):233-237. (XIE Kuangsheng. An imaging method of MIMO-SAR with compressed echo data[J]. Telecommunication Engineering, 2015,55(3):233-237.)
- [10] 梁美彦,曾邦泽,张存林,等.频率步进太赫兹雷达的一维高分辨距离像[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3):336-339. (LIANG Meiyan,ZENG Bangze,ZHANG Cunlin, et al. One-dimensional high range resolution profile of terahertz radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(3):336-339.)
- [11] COOPER K B,DENGLER R J,CHATTOPADHYAY G,et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008,18(1):64-66.
- [12] 金胜,朱天林,王海波. 步进频雷达成像技术研究进展[J]. 飞行器测控学报, 2013,32(6):490-495. (JIN Sheng,ZHU Tianlin,WANG Haibo. Advances in stepped-frequency radar imaging technology[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013,32(6):490-495.)
- [13] LIAO Z,LU D,HU J,et al. Waveform design for random stepped frequency radar to estimate object velocity[J]. Electronics Letters, 2018,54(14):894-896.
- [14] 吴盛源,张小宽,袁俊超,等. 基于 FEKO 的非合作目标动态极化散射特性实时仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 37(3): 97-100. (WU Shengyuan, ZHANG Xiaokuan, YUAN Junchao, et al. Real-time simulation of the dynamic polarization scattering characteristics of noncooperative target based on FEKO[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 37(3):97-100.)
- [15] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2016. (CHEN Boxiao. Modern radar system analysis and design[M]. Xi'an, China: Xidian University Press, 2016.)
- [16] ORTIZ-JIMÉNEZ G,GARCÍA-RIAL F,ÚBEDA-MEDINA L A, et al. Simulation framework for a 3-D high-resolution imaging radar at 300 GHz with a scattering model based on rendering techniques[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2017,7(4):404-414.
- [17] ROBERTSON D A, MACFARLANE D G. High-resolution long-range radar imaging at 94 GHz[J]. Proceedings of SPIE, 2006(6210):62100I-62100I-8.
- [18] 李思奇.高分辨单脉冲雷达距离像回波建模仿真[J].太赫兹科学与电子信息学报,2016,14(2):186-189. (LI Siqi. Modeling and simulation of high resolution monopulse radar range profile echo[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):186-189.)

作者简介:



庞维建(1986-),男,山东省夏津县人,工 程师,主要研究方向为空空导弹制导探测技术与 目标特性仿真.email:pangweijian2013@163.com. **李志强**(1981-),男,山西省昔阳县人,博士, 工程师,主要研究方向为空空导弹发射技术.

刘洪全(1983-),男,辽宁省大连市人,博士, 工程师,主要研究方向为空空导弹制导探测技术.

同志强(1978-),男,陕西省三原县人,硕士, 工程师,主要研究方向为空空导弹总体.

杨国胜(1976-),男,河北省卢龙县人,硕士,高级工程师,主要研究方向为空空导弹总体.