

基于 RCS 数据重构调频步进雷达动态目标回波^{*}

晏行伟¹, 陈付彬¹, 张泽建², 卢大威¹, 张军¹, 万建伟¹

(1 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073; 2 71834 部队, 河南荥阳 450100)

摘要: 调频步进雷达波形通常具有大带宽, 由目标逐个频点的 RCS 电磁计算数据直接重构雷达回波, 面临计算量巨大且高速运动目标回波难以实时计算的问题。基于线性雷达目标理论和 FFT 内插方法, 提出了一种调频步进雷达动态目标回波信号生成的新方法, 重点解决 chirp 信号子脉冲高速运动目标回波的实时生成问题。仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 调频步进雷达; 动态目标回波; 仿真重构; 线性雷达目标理论; FFT 内插恢复

中图分类号: TN955 文献标志码: A

Dynamic Target Echo Reconstruction of Chirp Stepped-frequency Radar from RCS Data

YAN Xingwei¹, CHEN Fubin¹, ZHANG Zejian², LU Dawei¹, ZHANG Jun¹, WAN Jianwei¹

(1 College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2 No. 71834 Unit, Henan Yingyang 450100, China)

Abstract: Chirp stepped-frequency radar waveform possesses large bandwidth generally. Echo Reconstruction from electromagnetic computed RCS of each frequency is a computationally intensive task and encounters real time problem for high speed targets. Using linear radar target theory and FFT interpolating method, a new method of dynamic target echo reconstruction of chirp stepped-frequency radar was proposed. The new method focuses on the real-time echo generation of high speed targets under Chirp stepped-frequency pulses. The numerical simulation was performed to illustrate the validity of the proposed method.

Keywords: chirp stepped-frequency radar; dynamic target echo; simulation reconstruction; linear radar target theory; FFT interpolating and restoring

0 引言

调频步进波形具有距离和速度高分辨的潜力, 其发射波形为载频步进的 chirp 信号子脉冲。在总带宽相同条件下, 与 chirp 脉冲相比, 降低了系统瞬时带宽; 与步进频率波形相比, 降低了所需的相参脉冲数。因此调频步进波形兼有这两种信号形式的优点而克服了各自的不足^[1]。当采用数字技术时, 在不改变硬件结构的前提下, 调频步进雷达可变换发射波形和相应的任务算法适应不同的战场态势, 最大限度的感知目标信息, 然而由于其大带宽和灵活性, 增加了信号处理算法的复杂度, 当采用 Monte-Carlo 方法对导引头雷达算法性能进行评估时, 迫切需要得到高逼真度的动态雷达目标回波。

传统的目标回波重构方法, 一般是从 RCS 数据中提取目标散射中心模型^[4], 再利用雷达信号理论重构回波信号。与之不同, 文中直接利用电磁计算软件 Radbase 计算结果, 保留数据高逼真度, 将 Radbase 计算的目标 RCS 以频率、姿态角为索引保存到数据库。根据线性雷达目标理论, 点频 RCS 序列是目标散射特性函数在频域内的离散采样, 将其与入射信号频谱的采样值序列相乘并做逆傅里叶变换, 就得到目标的时域回波^[5-6]。为了得到满足采样定理的时域回波, 要求目标 RCS 的频率采样较为密集, 尤其是在采用 chirp 发射信号的场合, 此时按采样定理需求的目标点频 RCS 数量对表征目标特性来说是冗余的, 若全部用 Radbase 预测, 计算量非常大。文献[9]采用自定制的 RCS 预测代码, 对目标 RCS 进行频率-姿态

* 收稿日期: 2011-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61002022); 武器装备预研基金项目资助

作者简介: 晏行伟(1985-), 男, 安徽含山人, 博士研究生, 研究方向: 导引头信息处理和抗干扰及其评估。

角内插,大大降低了计算回波的点频 RCS 数量。但 Radbase 计算目标 RCS 的代码已经固化,无法采用文献[9]的降采样率准则和方法。文中基于线性雷达目标理论和 FFT 内插方法,根据目标 RCS 起伏相关频率确定 RCS 计算频率间隔,而目标姿态角的变化范围全部根据预设的弹、目运动轨迹计算,从而大大降低了调频步进雷达动态目标回波重构的计算量。

1 回波建模和高频区目标散射特性

1.1 调频步进雷达基带回波信号建模

导引头雷达回波信号仿真模拟通常有 4 种类型,即射频模拟、中频模拟、视频模拟和基带复数据模拟。基带复数据经不同的 D/A 转换器、滤波器和平衡调制器组合可以分别得到视频信号、中频信号或者射频信号^[2],可见基带复数据模拟是其它 3 类模拟的基础。基带复数包含了目标全部电磁散射特征信息,获取逼真的回波基带复数据成为回波模拟的关键。

扩展目标雷达回波生成的传统方法是基于散射中心模型的^[3],静止目标的回波基带复信号表达式为:

$$s_b(t) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m p(t - \tau_m) \exp(j2\pi f_c \tau_m) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{T}\right) \exp[j\pi\mu(t - \tau_m)^2] \exp(j2\pi f_c \tau_m) \quad (1)$$

式中: $p(\cdot) = \text{rect}(\cdot/T) \exp[j\pi\mu(\cdot)^2]$ 为 chirp 脉冲复包络; T 为脉冲时宽; $\mu = B_c/T$ 为调频率, B_c 为脉冲带宽; f_c 为载频; M 为散射中心数目; A_m 为第 m 个散射中心(s. c.)_m 的回波幅度; R_m 为(s. c.)_m 到导引头雷达的距离; $\tau_m = 2R_m/c$ 为散射中心(s. c.)_m 到导引头雷达的双程时延; c 为光速。

1.2 高频区目标散射特性分析

在目标特性研究中,一般采用反射率函数 $\zeta(t)$ 作为目标不同部位的电磁散射特性的时域表征^[6],与目标的冲击响应等价,根据文献[7], $\zeta(t)$ 表示为:

$$\zeta(t) = \sum_{m=0}^{M-1} h_m(t) \quad (2)$$

$$h_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mn} \delta^{(n)}(t - \tau_m) \quad (3)$$

式中, n 取正值表示冲击函数 $\delta(\cdot)$ 的 n 次微分, 取负值则表示积分, 取 0 值表示冲击函数本身。

将式(3) 变换到频域得到:

$$H_m(f) = F\{h_m(t)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mn} \exp(-j2\pi f \tau_m) (j2\pi f)^n \quad (4)$$

式中: F 为傅里叶变换算子, F^{-1} 为逆傅里叶变换算子。

导引头雷达通常工作在高频区,故可利用 GTD 模型^[8],并将 n 用 α 代换,式(4)可近似为:

$$H_m(f) \approx A_m (j f/f_c)^{\alpha_m} \exp(-j2\pi f \tau_m) \quad (5)$$

综合式(2)和式(5),得到目标在高频区的频域特性:

$$Z(f) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m (j f/f_c)^{\alpha_m} \exp(-j2\pi f \tau_m) \quad (6)$$

文中研究远场条件下高频区的 chirp 子脉冲回波信号重构,根据线性雷达目标理论^[5],回波信号频谱是发射信号频谱对目标频谱进行整形后的片段,因此定量刻画发射信号频率范围内的目标频域特性就可以重构回波信号。

2 基于 RCS 数据重构调频步进雷达回波

文中假设目标满足远场条件,此时 RCS 与观测距离无关,下面首先分析基于 RCS 数据重构静止目标的调频步进雷达回波,然后考虑运动目标多普勒效应的影响,得到运动目标回波重构公式,最后获得由较少 Radbase 计算得到的复 RCS 数据生成高动态目标调频步进雷达回波的步骤。

2.1 静止目标回波重构原理

为分解雷达目标回波重构问题,选定目标几何中心作为相位参考点,其也可作为 Radbase 进行 RCS 预估的相位参考点。当相位参考点选定后,不同入射角度下的目标反射率函数或复 RCS 即可唯一确定。

chirp 子脉冲发射信号表示为:

$$s_r(t, i) = p(t - iT_r) \exp(j2\pi f_r t) \quad (7)$$

式中: T_r 为脉冲重复周期, f_r 为调频步进波形内第 i 个子脉冲载频。

回波信号 $s_e(t, i)$ 表示为:

$$s_e(t, i) = \zeta(t) * [p(t - iT_r - \tau_0) \exp[j2\pi f_r(t - \tau_0)]] = \zeta(t) * [p(t - iT_r - \tau_0) \exp(j2\pi f_r t)] \cdot \exp(-j2\pi f_r \tau_0) \quad (8)$$

式中: $\zeta(t)$ 为目标反射率函数, $\tau_0 = 2R_0/c$ 为雷达与目标几何中心的双程时延, R_0 为二者之间的距离, 卷积符号记作“*”。

将回波信号 s_r 与本振信号混频, 得到基带回波信号 $s_b(t)$ ^[6]:

$$s_b(t, i) = [\zeta(t) \exp(-j2\pi f_i t)] * p(t - iT_r - \tau_0) \cdot \exp(-j2\pi f_i \tau_0) \quad (9)$$

将 chirp 子脉冲复包络 $p(t)$ 的频谱记作 $P(f)$, 则 $F\{p(t - iT_r - \tau_0)\} = P(f) \exp[-j2\pi f_i (iT_r + \tau_0)]$, 对式(9)进行傅里叶变换得:

$$S_b(f, i) = Z(f + f_i) P(f) \exp[-j2\pi f (iT_r + \tau_0)] \cdot \exp(-j2\pi f_i \tau_0) \quad (10)$$

根据式(10), 对 $S_b(f)$ 取逆傅里叶变换得到回波基带信号:

$$s_b(t, i) = F^{-1}\{Z(f_i + f) P(f) \exp(-j2\pi f_i \tau_0)\} \exp(-j2\pi f_i \tau_0) \quad (11)$$

对式(11)进行离散化, 设时域复采样率为 f_s , 要求 f_s 大于等于 chirp 子脉冲带宽 B_r , 则:

$$\begin{aligned} f_s &\geq B_r \\ N_s &= Tf_s \geq TB_r \\ \Delta F &= B_r/N_s \leq 1/T \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可见, chirp 子脉冲内采样点数 N_s 为时宽带宽积, 而相邻采样点间频率变化量 ΔF 为 chirp 子脉冲未压缩时带宽的倒数。对式(11)进行离散化得到基带回波信号生成表达式(式(13)中, IFFT 表示逆快速傅里叶变换):

$$\{s_b(n, i)\}_{n=0}^{N-1} = \text{IFFT}\{\{Z(f_i + n\Delta F) \cdot P(n\Delta F) \cdot \exp(-j2\pi n\Delta F \tau_0)\}_{n=0}^{N-1}\} \cdot \exp(-j2\pi f_i \tau_0) \quad (13)$$

2.2 运动目标回波重构原理

当雷达与目标之间存在运动时, 可将多普勒效应等效为发射信号畸变, 若两者间径向速度 v 以接近为正, 则调频步进发射波形中第 i 个 chirp 子脉冲的等效表示为:

$$\begin{aligned} s'_r(t, i) &= \text{rect}\left(\frac{t - iT_r}{T/\gamma}\right) \exp(j\pi\mu\gamma^2(t - iT_r)^2) \cdot \\ &\exp(j2\pi f_i \gamma t) = \text{rect}\left(\frac{t - iT_r}{T/\gamma}\right) \exp(j\pi\mu\gamma^2(t - iT_r)^2) \cdot \\ &\exp(j2\pi f_d^{(i)} t) \cdot \exp(j2\pi f_i t) \triangleq p_1(t, i) \cdot \exp(j2\pi f_i t) \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $\gamma = 1 + 2v/c$ 为波形缩放系数。可见, 运动情况下, 等效子脉冲的时宽、调频率和载频都发生了变化。 $p_1(t, i)$ 为等效子脉冲包络, 表示为:

$$p_1(t, i) = \text{rect}\left(\frac{t - iT_r}{T/\gamma}\right) \exp(j\pi\gamma^2\mu(t -$$

$$iT_r)^2) \exp(j2\pi f_d^{(i)} t) \quad (15)$$

式中, $f_d^{(i)} = (\gamma - 1)f_i$ 为多普勒频率。理论上, $p_1(t)$ 的脉宽和调频率相比于 $p(t)$ 都发生了变化, 但是在实际工作场景中, 这种变化是可以忽略的(忽略的条件是 $2vTB/c \ll 1$)^[10]。另外, 在调频步进波形成像周期内, 可以认为目标速度近似不变, 子脉冲步进频率对多普勒的影响也很小, 因此可令成像期间 $f_d \equiv 2v f_0/c$ 。在上述近似后, $p_1(t, i)$ 表示为:

$$\begin{aligned} p_1(t, i) &\equiv \text{rect}\left(\frac{t - iT_r}{T}\right) \cdot \exp(j\pi\mu(t - iT_r)^2) \cdot \\ &\exp(j2\pi f_d t) = p(t - iT_r) \cdot \exp(j2\pi f_d t) \end{aligned} \quad (16)$$

经上述等效变换和近似之后, 应用线性雷达目标理论, 回波射频信号为:

$$s_r(t, i) = \zeta(t) * [p_1(t - \tau_0, i) \cdot \exp(j2\pi f_i(t - \tau_0))] \quad (17)$$

本振频率 f_i 保持不变, 对 s_r 混频, 参照式(9), 调频步进雷达的回波基带信号为:

$$\begin{aligned} s_b(t, i) &= [\zeta(t) \exp(-j2\pi f_i t)] * p_1(t - \tau_0, i) \cdot \\ &\exp(-j2\pi f_i \tau_0) = [\zeta(t) \exp(-j2\pi f_i t)] * \\ &p(t - iT_r - \tau_0) \exp(j2\pi f_d t) \cdot \exp(-j2\pi f_i \tau_0) \end{aligned} \quad (18)$$

对式(18)进行傅里叶变换, 得到:

$$\begin{aligned} S_b(f, i) &= Z(f_i + f) P(f - f_d) \cdot \\ &\exp[-j2\pi f (iT_r + \tau_0)] \cdot \exp(-j2\pi f_i \tau_0) \end{aligned} \quad (19)$$

再对式(19)进行离散化, 可得:

$$\{s_b(n, i)\}_{n=0}^{N-1} = \text{IFFT}\{\{Z(f_i + n\Delta F) \cdot P(n\Delta F - f_d) \cdot \exp[-j2\pi n\Delta F (iT_r + \tau_0)]\}_{n=0}^{N-1}\} \exp(-j2\pi f_i \tau_0) \quad (20)$$

2.3 仿真计算方法

由式(12)可知, 单个 chirp 子脉冲采样点数 N 等于子脉冲时宽带宽积, RCS 频域间隔等于子脉冲未压缩时带宽倒数 ΔF 。如果 Radbase 满足式(12)的原则下计算 $Z(f_n)$ 序列, 计算量过大而难以实现。

实际上, Radbase 计算 $Z(f)$ 的采样频率 ΔF_{sm} 应该由目标特性决定。文中采用目标 RCS 相关频率准则确定 ΔF_{sm} 。当散射体在目标上均匀分布时, RCS 相关频率 f_{corr} 与目标有效尺寸 l_r 的关系为 $f_{corr} = c/(2l_r)$ ^[11], 设目标最大可能径向长度为 L_{max} , 则最小的 RCS 相关频率为 $F_{corr} \triangleq \min\{f_{corr}\} = c/(2L_{max})$ 。根

据采样定理,当 $\Delta F_{sm} \leq F_{corr}/2$ 时,就能完全表征目标的频域特征,从而通过内插得到目标在任意频率点的 RCS,若取二者相等,则有:

$$\begin{aligned}\Delta F_{sm} &= c / (4L_{max}) \\ M_{sm} &= B_r / \Delta F_{sm}\end{aligned}\quad (21)$$

式中: B_r 为进行目标回波重构仿真时所关心的总带宽, M_{sm} 为通过内插得到带宽 B_r 范围目标 RCS 最少所需 Radarbase 计算的频点数目。

根据频域采样定理^[12],当目标 RCS 序列可以唯一确定目标散射特征时,利用频域插值公式,可以由该序列内插恢复目标在任意频率处的 RCS。仿照文献[13],当需要内插恢复的 RCS 序列频率在原始频率序列中均匀分布时,内插过程可由 IFFT 后接补零 FFT 进行快速计算;运动目标的多普勒频移可以为任意值,此时可先对原始序列进行 IFFT,再乘上一个频移为多普勒频率 f_d 的调制因子^[14],并对调制后的序列进行补零 FFT 变换,该过程表示如下:

$$\begin{aligned}\{Z(f_{it}^{(k)})\}_{k=0}^{K_{it}-1} &= \text{FFT}_{it}^{K_{it}} \{ \text{IFFT} \{ \{Z(f_{or}^{(m)})\}_{m=0}^{M_{sm}-1} \} \cdot \\ &\quad \exp \left(j \frac{2\pi m f_d}{M_{sm} \Delta F_{sm}} \right) \}\end{aligned}\quad (22)$$

式中: $f_{or}^{(m)}$ 为插值前原始序列的第 m 个频点, $f_{it}^{(k)}$ 为内插后的第 k 个频点, K_{it} 为内插序列总长度, $\text{FFT}_{it}^{K_{it}}[\cdot]$ 表示补零 FFT 运算。

Radarbase 软件计算的 RCS 序列为有限长度的,恢复频带内任意点频的 RCS 只能是近似的,且计算得到的 RCS 数据在频带边缘会出现纹波,纹波部分必须舍去,这就要求 Radarbase 预估的 RCS 范围略大于雷达工作频率范围。

综上所述,由满足 RCS 采样准则的复 RCS 序列生成高动态目标调频步进雷达回波的步骤如下:

Step 1: 确定 Radarbase 进行 RCS 计算的频率范围,对称覆盖雷达工作频率范围,低端和高端分别超出 5%。

Step 2: 由式(21)确定 RCS 计算间隔 ΔF_{sm} 最大值,并调整 ΔF_{sm} ,保证调频步进波形步进频率 Δf 为 ΔF_{sm} 的整数倍,进而确定总的频点数目 M_{sm} 。

Step 3: 由 Radarbase 计算运动轨迹上姿态角采样序列的多点频复 RCS 序列,以单个姿态角情况为例,将多点频复 RCS 序列记作 $\{Z(f_{opt}^{(m)})\}_{m=0}^{M_{opt}-1}$ 。

Step 4: 根据式(12)确定 chirp 子脉冲时域采样率 f_s 最小值,调整 f_s 保证其为 Δf 的整数倍。

Step 5: 存在相对运动时,在 chirp 子脉冲序列起始计算多普勒频率 $f_d = 2vf_0/c$,由式(19)得 chirp 等效子脉冲频谱 $\{P_1(n \cdot \Delta F)\}_{n=0}^{N_s-1} = \{P(n \cdot \Delta F - f_d)\}_{n=0}^{N_s-1}$ 。

Step 6: 如果相对加速度可以忽略,每个子脉冲时刻的多普勒频率相等,则按照式(22)进行一次运算即可获得整个脉冲串带宽内的 RCS 插值。否则,必须对每个子脉冲进行单独计算,从中取出对应的 RCS 序列。

Step 7: 利用式(13)或式(20)计算子脉冲回波。

3 算法仿真验证

基于目标 RCS 重构调频步进雷动态目标回波的数值仿真参数设定如下:雷达目标最大长度设为 $L_{max} = 30m$, 雷达载频 $f_0 = 10GHz$, 脉冲重复频率 $f_r = 10kHz$, chirp 子脉冲带宽 $B_r = 15MHz$, 脉冲宽度 $T = 5\mu s$, 子脉冲步进数 $N = 8$, 步进量 $\Delta f = 10MHz$, 总带宽 $B_r = 80MHz$ 。为保证输出信号的精度,信号采样率取为 40MSps, 则每个子脉冲采样点数为 $N_s = 200$, 脉内采样点的频率间隔为 $\Delta F = 50kHz$ 。为重构 chirp 回波子脉冲,需要获取 $[f_0, f_0 + 80MHz]$ 频率范围内 1600 个频点的 RCS 数据。Radarbase 预估 RCS 的频率间隔取为 $\Delta F_{sm} = 2.5MHz$, 范围取为 $[f_0 - 10MHz, f_0 + 90MHz]$, 这样共需计算 40 个频率点处的复 RCS 数据。

针对某一类型目标,在某一姿态角下,用 Radarbase 计算了 $[f_0 - 10MHz, f_0 + 90MHz]$ 频率范围内 2000 个点频的复 RCS, 抽取其中 40 个,用以内插恢复长度为 2000 的复 RCS 序列, 幅度和相位分别绘图, 与 Radarbase 实际计算的 RCS 对比, 示于图 1。图中实线为 Radarbase 密集计算的 RCS 序列, ‘+’号为抽取的 RCS 序列, 虚线为内插恢复的序列。为了图示多普勒效应的影响,图 1(b)中相对速度取为 15000m/s, 对应多普勒频率 1MHz, 从图 1(b)中看出, 内插的结果序列为原始 RCS 序列的左移版本, 位移量等于多普勒频率, 表明采用时域调制与 FFT 方法可以快速内插任意频率起始的 RCS 序列。内插 RCS 序列的首尾两端数据误差较大, 舍弃不采用。

为采用仿真实例验证说明回波重构方法的正确性,以文献[4]中的散射中心模型为基础,分别采用两种方法重构目标回波,再经脉压合成目标宽带距离像进行对比。方法 1:首先利用散射中心模型生成满足式(12)采样率的目标 RCS 序列,利用文中方法从

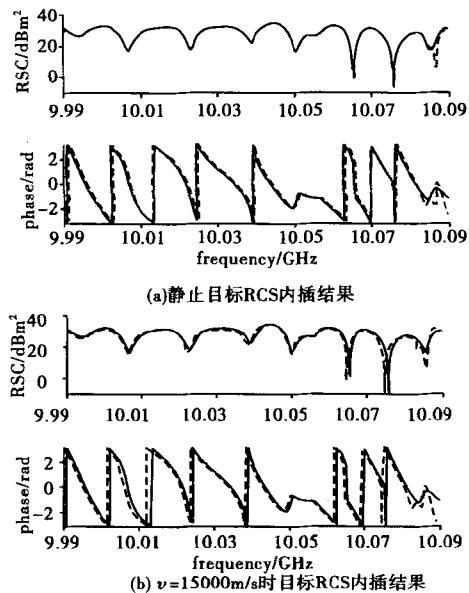


图1 多频点的插值 RCS 序列与实际计算 RCS 序列对比
该序列重构时域回波。方法 2: 直接从散射中心模型
生成目标回波。由两幅一维距离像可以看出, 文中采
用的回波生成方法与直接从散射中心产生回波的方
法具有很好的逼近效果。

4 结论

文中基于线性
雷达目标理论, 主
要研究了在 chirp
信号子脉冲照射下
动态目标的回波重
构问题。提出了一
种适用目标电磁特
性计算的频域采样
原则, 即 RCS 相关
频率原则, 通过内
插方法解决了任意
频率点目标 RCS 估
算问题, 大大减小
了计算量, 特别适
合于动态场景下调
频步进雷达目标回

波建模。在验证文中算法时, 首先利用散射中心模型
生成满足采样准则目标 RCS 序列, 从中重构雷达回
波并合成目标距离像, 与利用散射中心模型直接生成
目标回波并合成的距离像对比, 验证了算法有效性。

需要指出的是, 文中所提出的回波重构理论是将
目标作为一个整体考虑(仅考虑平动), 故当目标处

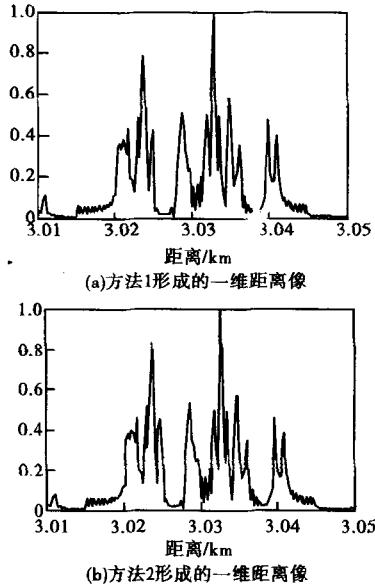


图2 基于内插 RCS 序列重构
回波逼真度验证

于远场条件但目标存在绕自身轴向的转动, 或者近距
离条件下目标各组成部分的多普勒差异不能忽略时,
需要从电磁计算数据中提取散射中心模型, 对各个散
射中心的运动情况进行具体分析, 然后采用文中提出
的方法生产单个散射中心回波再综合生成整体的目
标回波。

参考文献:

- [1] 贺志毅. 合成宽带毫米波雷达导引头的理论及实现[D]. 北京: 航天科工集团第二研究院 25 所, 2002.
- [2] 张直中. 雷达信号的选择与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [3] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [4] E J Hughes. Radar cross section modeling using genetic algorithms[D]. Royal Military College of Science, 1998.
- [5] [苏]Л Т Тучкова. 飞行器雷达特性[M]. 马清海, 杨逢春译. 洛阳: 信息获取与处理技术交流中心出版, 1989.
- [6] A J Wilkinson, R T Lord, M R Inggs. Stepped- frequency processing by reconstruction of target reflectivity spectrum [C]//Proceedings of the 1998 South African Symposium on Communications and Signal Processing, Roodebosch, 1998: 101-104.
- [7] R A Altes. Sonar for generalized target description and its similarity to animal echolocation systems[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1976, 59(1): 97-105.
- [8] L C Potter, Da-Ming Chiang, R Carrière, M J Gerry. A GTD-based parametric model for radar scattering[J]. IEEE Antennas and Propagation, 1995, 43(10): 1058-1067.
- [9] Yuanxun Wang, Hao Ling. Efficient radar signature prediction using a frequency-aspect interpolation technique based on adaptive feature extraction[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2002, 50(2): 122-131.
- [10] E J Kelly, R P Wishner. Matched-filter theory for high- velocity, accelerating targets[J]. IEEE Military Electronics, 1965, 9(1): 56-69.
- [11] D K Barton. 雷达系统分析与建模[M]. 南京电子技术研究所, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [12] 史林, 赵树杰. 数字信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] 丁丽娟, 程杞元. 数值计算方法[M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- [14] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky. 信号与系统(2nd) [M]. 刘树棠, 译. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.

雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程:

● HFSS 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● CST 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● 天线设计培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>