

近程战场侦察雷达的视频信号仿真

宋耀良

(南京理工大学, 江苏南京, 210094)

摘要 通过对战场侦察雷达回波信号的分析,建立了视频信号仿真模型,并以8mm连续波二相码调制雷达为例对视频形式的回波信号进行了计算机仿真。其结果可以供雷达系统设计和信号分析时参考。

关键词 近程雷达;回波分析;信号仿真

目前,近程雷达得到了越来越广泛的应用。特别是连续波(CW)体制的近程雷达,在侦察、测速和跟踪等方面正在或即将起着重要作用。但通常这种雷达架设在离地面较低的高度上,且所测目标都贴近地面,所以雷达接收到的回波中含有许多目标信号以外的成分。这些成分干扰甚至严重地干扰了雷达对目标的正常探测。在雷达系统设计中,经常会遇到如何选择雷达工作参数、架设雷达和进行信号处理才能有效地提取目标信息、减弱地面杂波的干扰和减小测量误差等问题。要解决这些问题,采用以往对一般雷达的分析方法显然存在一定局限性。本文试图通过对近程战场侦察雷达工程环境及其回波信号组成的分析,建立一个能供雷达系统设计、参数选择运用的计算机仿真模型,并以常用连续波二相码调制雷达为例,对回波信号进行了仿真。其结果与理论分析具有一定参考价值。

1 信号分析与建模

战场侦察用地面近程雷达的应用环境是比较复杂的,在信号建模时要考虑的因素比较多。首先是雷达系统本身参数的影响,诸如工作频段、调制方式、天线波瓣宽度及波束指向等。其次是目标散射特性的影响,战场侦察雷达在大多数工作情况下目标是敌方车辆、人员及弹丸,建模时除了要考虑其运动状态外,还必须考虑其分布特性;根据文献[1],对于分布型目标,可将其等效成两个点目标(或两个以上点目标)处理。最后是地面散射特性的影响,它主要受雷达、目标和地面的相对几何关系、雷达工作波长、地面粗糙度、平均倾角及植被情况的影响。在分析与建模中,主要依据这三方面的因素,在把握主要矛盾的同时,建立尽量简化的模型。

为了便于分析,按照文献[1]给出的目标搜索和截获的雷达系统及背景,画出了如图1.1所示的雷达、目标和地面的相对几何关系图。其雷达回波一是由目标反射引起的路径为RTR的目标信号;二是由目标和地面相互反射引起的路径为RTCR和RCTR的回波;三是由地面后向散射引起的路径为RCR的杂波。

(1) 点目标回波仿真模型 在建立模型之前,假设点目标是各向同性,且静止不动,其雷达截面积为 σ ,反射初相为 φ 。则点目标的复反射系数为

1997年9月收稿,1998年3月定稿。

$$\gamma = \sqrt{\sigma} e^{j\varphi} \tag{1.1}$$

根据雷达方程,雷达接收功率 $P_R(t)$ 为

$$P_R(t) = P_T(t - \tau) \frac{G^2 \lambda^2 \gamma^2}{(4\pi)^3 \gamma^4} \tag{1.2}$$

式中 γ 为目标离雷达的径向距离; τ 为对应的双程延迟; λ 为雷达工作波长; G 为对应方向的天线增益; $P_T(t)$ 为雷达发射功率。将 (1.2) 式改为电压形式的表达式

$$X_R(t) = X_T(t - \tau) \frac{\lambda G \gamma}{(4\pi)^{3/2} \gamma^2} \tag{1.3}$$

式中 $X_T(t)$ 为雷达发射信号, 用 $|X_T(t)|^2 = P_T(t)$ 。设雷达信号的复调制函数为 $\mu_T(t)$, 则 $X_T(t)$ 可表示为

$$X_T(t) = \mu_T(t) e^{j(2\pi f_0 t + \varphi_0)} \tag{1.4}$$

式中 f_0 为载频; φ_0 为初相。对于 CW 二相码调制雷达, $\mu_T(t)$ 可表示为

$$\mu_T(t) = \frac{1}{\sqrt{NT_P}} \sum_{i=1}^N x_i \text{rect}\left(\frac{t - T_P/2 - iT_P}{T_P}\right), \quad 0 \leq t \leq NT_P \tag{1.5}$$

式中 T_P 为码元宽度; N 为雷达观察时间内码元个数; $\{x_k\}$ 为码序列, 且 $x_k = +1$ 或 -1 。矩形函数为

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T_P/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \tag{1.6}$$

把 (1.4) 式代入 (1.3) 式可得

$$X_R(t) = \frac{\lambda G \sqrt{\sigma}}{(4\pi)^{3/2} \gamma^2} \mu_T(t - \tau) e^{j(2\pi f_0(t - \tau) + \varphi_0 + \varphi_\gamma)} \tag{1.7}$$

如果令 $V = \lambda G \sqrt{\sigma} / (4\pi)^{3/2} \gamma^2$, 则 (1.7) 式可简化为

$$X_R(t) = V \mu_T(t - \tau) e^{j(2\pi f_0(t - \tau) + \varphi_0 + \varphi_\gamma)} \tag{1.8}$$

式中 V 在仿真中常被称之为复电压系数; $\varphi_\gamma = \varphi + \varphi_0$, φ_0 为点目标反射的初相。上述是点目标模型, 实际目标信号要复杂一些。

(2) 实际目标信号模型 由于雷达作用距离比较近, 可把目标分解成两个(或两个以上)的点目标。另外, 战场侦察雷达所测的目标往往处于运动状态, 这时在仿真过程一些参量就不再是常数, 应改换成时变函数。下面是用两个点目标代表真实目标所得仿真模型。

$$X_{TR}(t) = V_{T0} \mu_T[t - \tau_{T0}(t)] e^{j(2\pi f_0[t - \tau_{T0}(t)] + \varphi_{T0})} + V_{T1} \mu_T[t - \tau_{T1}(t)] e^{j(2\pi f_0[t - \tau_{T1}(t)] + \varphi_{T1})} \tag{1.9}$$

式中 τ_{T0}, τ_{T1} 和 $\varphi_{T0}, \varphi_{T1}$ 分别为两个点目标的双程延迟和初相; V_{T0}, V_{T1} 为其对应复电压系数

$$V_{T0} = \frac{G_0(t) \lambda \sqrt{\sigma_0(t)}}{(4\pi)^{3/2} \gamma_0^2(t)}, \quad V_{T1} = \frac{G_1(t) \lambda \sqrt{\sigma_1(t)}}{(4\pi)^{3/2} \gamma_1^2(t)} \tag{1.10}$$

式中 $G(t), \sigma(t), \gamma(t)$ 是由于目标在运动中姿态, 位置有所变化, 所以设定为时变函数。当然, 如果目标比较小(如弹丸等), 且测量时对方向要求不高时, 也能用单一点目标代表真实目标, 而不失其真实性。

(3) 多路径效应引起的回波 多路径效应是由地面和目标相互作用引起的, 它的大小在很大程度上取决于地面前向散射的性能。一般地面越光滑, 多路径效应越明显。它的仿真可用真实目标的镜像目标模型来实现。回波的强弱由镜像反射系统 ρ_s 确定, 且 $\rho_s = \rho_0 \exp[-2(2\pi \sigma_n \sin \psi)^2 / \lambda^2]$, ρ_0 为理想地面的 Frnesnel 反射系数, σ_n 为地面高度均方差, ψ

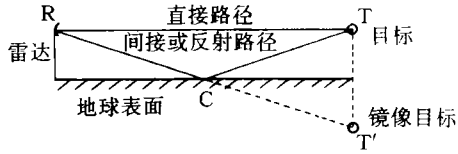


图 1.1 雷达、目标和地面相对几何关系
Fig. 1.1 The relative geometrical relationship among radar, target and the ground

为电磁波入射余角。多路径效应仿真的模型为

$$X_{\text{TCR}}(t) = V_{\text{TC0}}\mu_{\text{T}}[t - \tau_{\text{TC0}}(t)]e^{j(2\pi f_0[t - \tau_{\text{TC0}}(t)] + \varphi_{\text{TC0}})} + V_{\text{TC1}}\mu_{\text{T}}[t - \tau_{\text{TC1}}(t)]e^{j(2\pi f_0[t - \tau_{\text{TC1}}(t)] + \varphi_{\text{TC1}})} \quad (1.11)$$

式中 $V_{\text{TC0}}, V_{\text{TC1}}, \tau_{\text{TC0}}, \tau_{\text{TC1}}, \varphi_{\text{TC0}}, \varphi_{\text{TC1}}$ 分别与镜像目标一一对应。

(4) 地面杂波 地面杂波主要是由地面的后向散射引起的。杂波干扰对于地面比较粗糙或工作波长比较短的雷达是比较严重的,地面越粗糙,电磁波的后向散射越强。地面粗糙度可用 Rayleigh 判据进行判别。若 $\sigma_h < (\lambda/8\sin\psi)$,则可认为地面是光滑的,否则是粗糙的。地面散射特性可用单位面积的雷达截面积 σ_0 来表示

$$\sigma_0 = A(\theta + C)^B \exp[-D/(1 - 0.1\sigma_h/\lambda)] \quad (1.12)$$

式中 A, B, C, D 是与频率和地面植被等有关的参数^[2,3]。

在实际仿真过程中,由于地面是一个分布面极广的散射体,所以可根据具体散射情况,将地面划分成若干个小的散射单元,每个等效成一个点目标。这样可用类似于目标信号回波的求法得到表达式:

$$X_{\text{CR}}(t) = \sum_{i=1}^n V_{\alpha i} \mu_{\text{T}}[t - \tau_{\alpha i}(t)]e^{-j(2\pi f_0 \tau_{\alpha i}(t) + \varphi_{\alpha i})} \quad (1.13)$$

式中 $V_{\alpha i}, \tau_{\alpha i}, \varphi_{\alpha i}$ 分别对应于第 i 个散射单元。

(5) 总的回波及其视频表达式 雷达所接收的回波是上述三个组成部分的和,亦即

$$X_{\text{R}}(t) = X_{\text{TR}}(t) + X_{\text{TCR}}(t) + X_{\text{CR}}(t) \quad (1.14)$$

该式表示回波的射频形式。在实际仿真中,可对雷达回波在经过混频以后的视频信号进行仿真,其模型只须在各式中将公有因子 $e^{j2\pi f_0 t}$ 提出就行了。雷达回波的视频信号表达式为

$$X_{\text{R}}(t) = \sum_{i=0}^1 V_{\text{Ti}} \mu_{\text{T}}[t - \tau_{\text{Ti}}(t)]e^{-j[2\pi f_0 \tau_{\text{Ti}}(t) + \varphi_{\text{Ti}}]} \sum_{i=0}^1 V_{\text{TCi}} \mu_{\text{T}}[t - \tau_{\text{TCi}}(t)]e^{-j[2\pi f_0 \tau_{\text{TCi}}(t) + \varphi_{\text{TCi}}]} + \sum_{i=0}^n V_{\alpha i} \mu_{\text{T}}[t - \tau_{\alpha i}(t)]e^{-j[2\pi f_0 \tau_{\alpha i}(t) + \varphi_{\alpha i}]} \quad (1.15)$$

2 回波信号的计算机仿真

在仿真中,关键是复电压系数的计算,该系数除了与地面散射特性有关外,还和雷达与地面及目标的相对几何关系有关。假设天线口径场的分布为一余弦函数,亦即

$$f = \frac{\cos(\pi W/2)}{1 - W^2} \quad (2.1)$$

式中 $W = 2d\sin\varphi/\lambda$, d 为天线口径直径, φ 是偏离瞄准轴的角度。天线增益 $G = \eta[\frac{1}{2}kd]^2$, η 为天线效率, k 为常数。波长为 8mm 时,根据文献[3],对应农作物,草地覆盖的地面参数 A, B, C, D 分别为 0.3, 2, 0.036, 0。由此得

$$\sigma_0 = 0.3(\theta + 0.036)^2 \quad (2.2)$$

对于雪地或其它类型地面参数取值可参见文献[3]。

雷达回波信号仿真的原理框图这里从略,仿真过程主要步骤:(1)随机相位的产生;(2)复电压系数的计算;(3)回波分量的计算;(4)回波分量求和。图 2.1 是由仿真得到的雷达回波随距离变化情况,横坐标为目标距离,纵坐标为信号强度。为了能反映目标大小对回波信号的影响,分别用坦克和反坦克导弹作为目标,其雷达截面积 RCS 分别为 25m² 和 0.1m²。图 2.1 仅对应于坦克目标,(b)为滤除杂波后的信号变化;而对应于弹丸目标和经过滤除杂波后的信号变化图这里都从略。

从图可以看出,对于像坦克之类 RCS 比较大的目标,在较近的作用距离上,不经过杂波滤除,雷达发射波形还清晰可见,但当目标所处位置比较远时(约 1 000m),雷达的目标信号已淹没在杂波之中,这时如不进行杂波滤波是难以识别目标的。对于像弹丸、人员这样的小散射目标,在很近的目标距离上杂波就已将信号淹没了,此时只有经良好的滤除杂波,才能提取目标信息。另外,由于取 $\lambda = 0.008\text{m}$,而多路径效应产生的波形变化在经滤除杂波后的图中没有充分表现出来,这从另一侧面说明多路径效应对毫米波影响较小。

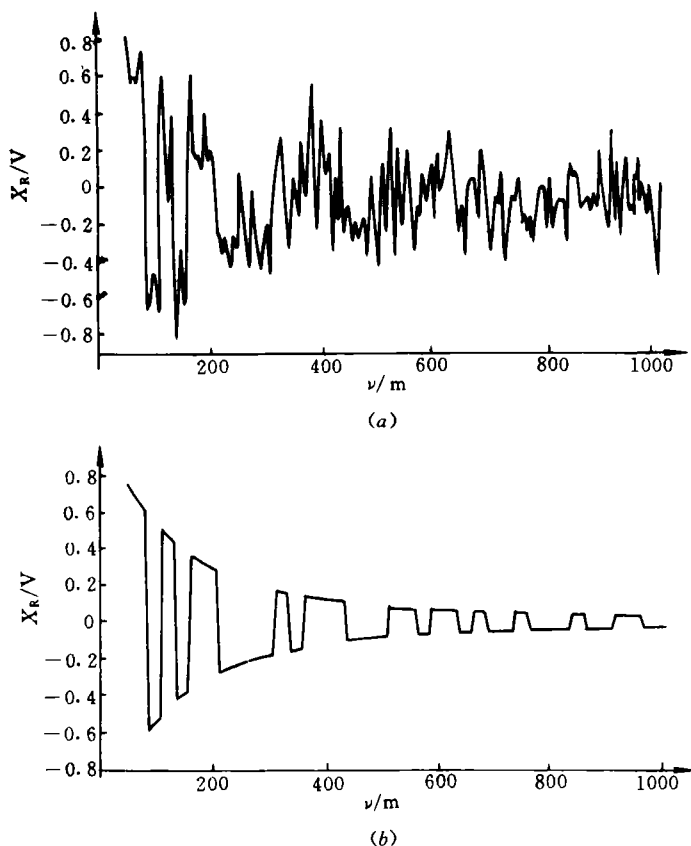


图 2.1 雷达回波与目标距离的关系

Fig. 2.1 The relationship between the echo and the distance of target

3 结论

从分析和计算机仿真可看出,连续波二相码调制近程地面侦察雷达的回波信号中地面的杂波干扰是十分严重的,特别是对于小目标的探测更是如此,因此对杂波滤波性能的好坏将直接影响整个雷达系统的性能,这与作者经过实验观察的结果是一致的。

参考文献

- 1 宋耀良. 近程随机信号雷达抑制技术. 现代雷达, 1993, 15(1): 33~39
- 2 Barton D K, Cook C E, Hamilton P. Radar Evaluation Handbook. Artech House, 1990
- 3 Button K J, Wiltes J C. Millimeters Systems. Academic Press, 1981

SIMULATION FOR VIDEO SIGNAL OF SHORT RANGE BATTLEGROUND INVESTIGATING RADAR

Song Yaoliang

(Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094)

Abstract In this paper, a video signal simulation model is proposed by analysing echo of in battlefield detecting short range radar. Video echo signal of CW radar modulated by binary code signal is simulated. The results can be used as references for the design of radar system and signal analysis.

Key words short range radar, echo analysis, signal simulation