

The Signal-to-noise Ratio Analysis and Enhancement Methods of the Radar Receiver Intercepting Weak Signal

Chuan-Jun Chen

Jinling Institute of Technology, 211169, Nanjing, China

e-mail ccj507201@163.com

Abstract: Coping with the weak signal radar target, there are two aspects ensure examining goal successfully, that is, how to get the information of the weak signal from the complex clutter and the noise background; how to enhance signal-to-noise ratio (SNR). So, they are important parts in designing radar receiver. The article analyzes the SNR of radar receiver intercepting signal, puts forward the time correlation waveform matching method. Through this method, using the time difference between signal pulse and noise, design the real-time related selection to enhance the SNR under the noise interference.

Key words: Weak signal target; SNR; time correlation; impulse response

雷达接收机侦收微弱信号信噪比分析及提高方法

陈传军

金陵科技学院信息技术学院, 中国, 南京, 211169

E-mail ccj507201@163.com

【摘要】对付弱小信号的雷达目标, 如何从复杂的杂波和噪声背景中提取弱小信号目标的信息, 如何提高信噪比(SNR)是成功检测目标的重要保障, 也成为雷达接收机研究设计的一个重要部分。本文通过对雷达接收机侦收信号的信噪比分析, 进而提出采用时间相关波形匹配方法, 在噪声干扰背景下利用信号的脉冲与噪声存在的时间差异特性, 设计实时相关选通, 提高雷达接收机侦收信号信噪比。

【关键词】弱小信号目标; 信噪比; 时间相关; 冲激响应

1 引言

对于雷达接收机侦收的微弱雷达信号, 如何从复杂的杂波和噪声背景中提取弱小信号目标的信息成为雷达接收机研究设计的一个重要部分, 对弱小雷达目标信号处理的关键在于设法提高回波信号的功率信噪比。现代雷达信号处理通常可以采用发射大时宽带宽的调频信号进行脉冲压缩的方法来提提高信噪比, 脉冲压缩是对弱小信号进行信噪比放大的重要手段。然而有时候仅仅对回波信号进行脉冲压缩处理还不能满足信号检测的要求, 还要对其进行脉冲积累从而进一步提高信噪比。脉冲积累是利用相邻回波信号自身的相关性, 来积累信号能量, 而噪声则不具备这种相关性, 累加后能够得以平滑, 从而提高了信噪比。本文通过对雷达接收机侦收信号的信噪比分析, 进而提出采用时间相关波形匹配方法, 在噪声干扰背景下利用信号的脉冲与噪声存在的时间差异特性, 设计实时相关选通, 提高雷达接

收机侦收信号信噪比的方法。

2 雷达接收机侦收信号的信噪比分析

侦收信号的信噪比可以反映一定条件下的侦收信号与有效噪声之间的关系。如果侦收系统和被侦收雷达接收机的损耗等于 1, 此时, 系统侦收到的信号电平为:

$$S_E = \frac{P_T G_{TE} G_E \lambda^2}{(4\pi)^2 R_E^2} \quad (1)$$

式中: P_T 为雷达发射的信号功率(W); λ 为波长(m); G_{TE} 为侦收方向上雷达发射天线的增益; G_E 为侦收天线增益, $G_E \doteq 4\pi A_E / \lambda^2$, A_E 为侦收天线可利用的口径面积(m²); R_E 为侦收天线到达雷达发射源的距离(m)。

在数字处理的侦收系统中, 通常采用侦收一个脉

冲所需的信号电平来估算它的信噪比, 侦收到一个脉冲的信号电平为:

$$S_E = \frac{EG_{TE}A_E}{4\pi R_E^2 \tau} \quad (2)$$

式中: τ 为信号脉冲宽度 (s); E 为侦收信号能量, $E = P_{AV}T$; P_{AV} 为平均功率; T 为脉冲重复周期。

当侦收连续照射的跟踪雷达信号时, 假设侦收到的信号脉冲为矩形脉冲, 能量包含在发射波形内, 而侦收系统最合适的系统带宽为 $B_{OP} = 1/\tau$ 。此时, 脉冲能量连续等幅照射到侦收天线上。见图(1)的连续照射截获模型, 雷达波束照射一个周期 T 的区间, 侦收跟踪雷达信号截获一个脉冲, 可产生的侦收信号电平和噪声电平的比为:

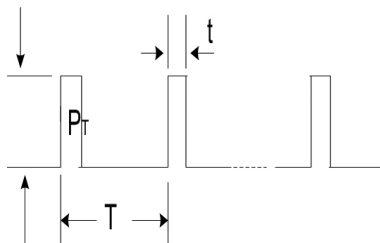


图1. 连续照射截获模型

$$(S/N_0)_{E \cdot T} = \frac{P_{AV}TG_{TE}A_E}{(4\pi)R_E^2KT_0F_N} \quad (3)$$

式(3)所示, 在跟踪照射的时间内, 所侦收到的脉冲系列是一组近似等幅、等距的脉冲串, 如果它们能跨越信号门限就可直接编码处理。

式(3)表明, 侦收信号电平对噪声电平的比, 正比于天线可利用的面积 A_E 和被侦收到的信号脉冲的平均功率 P_{AV} , 也与侦收距离 R_E 的平方成反比。

当侦收圆周扫描搜索雷达信号时, 雷达天线波束按一定的周期作圆周扫描搜索运动。由于被侦收波束等速旋转, 照射到侦收天线的信号强度按一定规律变化, 见图(2)。

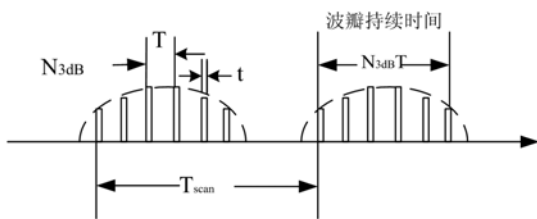


图2. 圆周扫描模型

波束运动使侦收到的脉冲幅度按照类似于 $\sin x/x$

型的包络变化, 而脉冲的重复周期不变。因此, 在扫描波束内, 每一脉冲的信号能量也按扫描包络分布。其扫描包络的带宽为:

$$B_{scan} = \frac{1}{TN_{3dB}} \quad (4)$$

式中: N_{3dB} 为 3dB 波束宽度(水平波束)内含脉冲数, $N_{3dB} = (T_{scan} \cdot \theta_{3dB}) / 360^\circ \cdot T$; T_{scan} 为波束扫描周期(s), θ_{3dB} 为 3dB 水平波瓣宽度($^\circ$)。

由式(4)表明, 利用圆周扫描模型的扫描包络带宽, 可描述为一低通滤波器, 它的频带宽度为 B_{scan} (Hz), 可引入幅度变化的等间隔脉冲重复周期为 T 的矩形脉冲串, 见图 3。

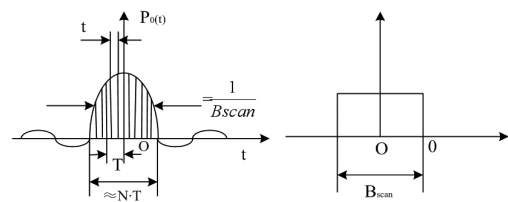


图3. 扫描包络模型图

表达式为:

$$P_S(n) = \sum_{n=1}^N a_n = \frac{\sin(\pi n / N)}{\pi n / N} \quad (5)$$

式中: a_n 为包络内含脉冲的最大幅度单位量值; n 为脉冲顺序号数, $n=1, 2, 3, \dots, N$; N 为扫描波束内含脉冲数。

因此, 在侦收圆周扫描波束内, 第 n 个脉冲的信号电平为:

$$S_n(t) = \frac{EG_{TE}A_E}{(4\pi)R_E^2 \tau} \cdot \frac{\sin(\pi B_{scan} t)}{\pi B_{scan} t} \quad (6)$$

式中: $t=nT, T$ 为脉冲重复周期 (s)。

式(6)表明, 侦收扫描波束内的每一脉冲获得的信号电平是变化的。当 $n/N=1/2$ 时, 该脉冲的信号电平可能最大; 当 $n/N=1$ 时, 侦收到的脉冲信号电平可能是微弱信号电平。微弱信号电平很难跨越信号门限进入编码处理。

因此, 侦收搜索扫描雷达信号时, 侦收系统需要的最小信号电平应对准到波束扫描包络内的被侦收最小信号电平的脉冲上, 其相应的侦收信号需要的灵敏度将得到提高。

因此, 侦收圆周扫描波束内含每一脉冲的信噪比可为:

$$(S / N_0)_{E,S}(t) = \frac{P_{AV} T G_{TE} A_E}{4\pi R_E^2 K T_0 F_N} \cdot \frac{\sin(\pi B_{scan} t)}{\pi B_{scan} t} \quad (7)$$

式(7)指出, 侦收圆周扫描雷达信号时, 由于波束内每一脉冲信号能量的变化, 其相应的信号电平也要变化。对波束内信号电平最小脉冲的截获, 就需要侦收系统的灵敏度高于对信号电平最大脉冲截获所需的灵敏度。特别对窄波束雷达信号的截取需要较高的灵敏度, 以免丢失脉冲影响信号处理。

当侦收搜索扫描的跟踪雷达信号时, 例如巡航导弹的末制导雷达信号, 它的天线波束先按一定的周期搜索扫描寻找攻击目标, 待找到攻击对象后进入跟踪状态。

假设被侦收雷达波束在球面角 Ω 的范围内, 扫描时间为 t_s 。雷达天线波束包含的一个球面角为 Ω_b , 此时, 雷达天线增益可为: $G_{TE} = 4\pi / \Omega_b$ 。

如果被侦收雷达波束包含的方向上驻留时间为 t_0 , 总的扫描时间为:

$$t_s = t_0 \Omega / \Omega_b \quad (8)$$

此时, 在驻留时间 t_0 , 产生波束包含方向上的能量为: $E = P_{av} t_0$, 侦收系统的信噪比为:

$$(S / N_0)_s = \frac{P_{AV} A_E}{R_E^2 K T_0 F_N} \cdot \frac{t_s}{\Omega} \quad (9)$$

式(9)表明, 侦收搜索扫描雷达波束信号时, 系统信噪比与扫描时间对相应球面角的比值成正比。 t_s / Ω 越大, 信噪比就越大, 有利于获得捕获该信号的灵敏度。

3 干扰和杂波对系统信噪比的影响

实际侦收雷达信号时, 侦收系统有时会受到干扰和杂波的影响, 使系统信噪比下降或功能阻塞, 在干扰和杂波的影响下, 即使在极近的距离范围内, 对已知雷达信号也难以截获。其影响情况分别叙述如下:

3.1 干扰

侦收系统受到外界噪声源的干扰, 会使侦收雷达信号需要的信号电平发生变化。如果侦收天线采用定向搜索天线或等幅测向天线阵列, 其干扰信号可从侦收天线副瓣或等幅相邻天线进入。此时, 侦收系统噪声电平与干扰噪声功率电平相比, 可以忽略。对搜索扫描雷达信号来说, 系统的信号电平与干扰噪声功率电平的比, 不论从天线副瓣, 还是从等幅相邻天线进入的干扰噪声, 只要干扰噪声功率电平和干扰天线增益的乘积增加, 就会使信号电平与干扰噪声功率电平

的比值下降。当干扰噪声功率电平达到一定的程度, 可以淹没侦收系统侦收的信号电平, 使雷达侦察设备失去截获该雷达信号的能力。

3.2 杂波

当雷达波束掠过地面时会在扫掠或照射面积上产生反射而形成杂波, 杂波功率电平的大小取决于: 雷达波束掠过地面面积大小或表面动态、波束照射单位面积的能量、波束极化系数、波束掠地的角度。这些杂波类似于噪声电平, 使系统信噪比下降, 也使灵敏度下降或阻塞侦收系统对被侦收雷达信号的截取。

4 提高雷达接收机信噪比的方法与实施

脉冲压缩处理和脉冲积累处理能够提高信噪比, 是提取弱小信号目标雷达信号信息的有效方法, 对脉冲压缩处理提高信噪比的方法, 本文不作论述, 本文只论述通过脉冲积累处理, 即通过采用时间相关波形匹配方法, 在噪声干扰背景下利用信号的脉冲与噪声存在的时间差异特性, 设计实时相关选通, 提高雷达接收机侦收信号信噪比的方法。

我们知道对周期为 T 的周期信号 $p(t)$ 的自相关函数:

$$p(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) p(t + \tau) dt \quad (10)$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) p(t + \tau + nT) dt$$

因此: $p(\tau) = p(\tau + nT)$, 从公式(10)中可以得出: 周期性信号的自相关函数也是周期性的, 它随时差 τ 的变化周期也是 T 。因为随机噪声信号为高斯分布函数, 所以随机噪声信号的自相关函数随 τ 的增大迅速下降到 0, 由此可以利用信号自相关来检测淹没在噪声中的周期信号。

若响应为系列脉冲, 在周期 T 内, τ 相对很小, 利用组成的已知定长重频跟踪器与输入信号 $p_i(t)$ 的脉冲前沿实时同步, 产生的冲激响应系列为:

$$h(t) = a(t) \cdot \sum_{i=0}^n \delta(t - nT) \quad (11)$$

若侦收雷达脉冲信号为 $p_i(t)$, 侦收过程某一瞬间截获已知基本参数 $T(PRI)$, 就可产生带有波套 $a(t)$ 的冲激响应来选通相关侦收, 进一步捕获该信号的相关选择参数: 载频 RF , 脉冲宽度 PW 和脉冲入射方位 AOA 。由 DSP 装定相关重频跟踪器的 PRI 和 $a(t)$ 进行跟踪侦收。选通脉冲匹配的时间相关是以信号脉冲和噪声的

时间差异为基础的脉冲波形匹配方法,可在噪声干扰背景下提高输出信噪比,以至获得最佳侦收的输出信噪比。见图4时间相关的实施框图。

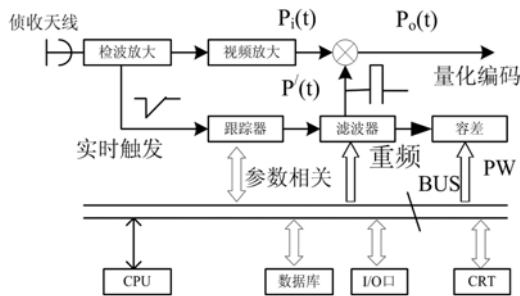


图4. 时间相关实施框图

时间相关技术可通过采用时域上的重频滤波器、参数相关选择器和容差电路来实现。由侦收天线截获的雷达高频信号经检波放大形成输入脉冲信号 $p_i(t)$, CPU 按 PRI 和 $a(t)$ 装定参数于重频滤波器,产生类似于冲激响应的选通脉冲 $p'(t)$, 当 $p'(t)$ 的脉冲存在时,就有相关输出 $p_o(t)$,从而提高输出信号峰值功率与平均噪声功率比。

侦收系统的选通相关控制点可设置在:

- 检波器或检波器前端 它的信噪比包含检波器的信噪比,噪声带宽可近似看作载频波段范围或中频频带宽度;

- 检波器后的前放上 信噪比是视频带宽内的信噪比,视频带宽等于载频带宽或中频带宽的一半。

输入信号 $p_i(t)$ 的脉冲系列通常交叉和重叠于密集的脉冲群内,经检波后仍然是各种重频周期的脉冲信号交叉重叠的组合。侦收系统将每个脉冲量化编码,按到达时间顺序采集或实时卷积,以分选出雷达信号各种参数供识别和显示。

选通脉冲匹配的时间相关,首先要有脉冲重复间隔 (PRI) 这项雷达信号参数,其实施的基本方法有:

- 实时卷积跟踪相关,由硬件实时获取噪声起伏变化有利瞬间的脉冲,自动卷积装定跟踪,其截获概率高,获取的输出信噪比也高;

- 数据库装定相关,使用情报获取的雷达信号参数存贮于数据库内,在侦收信号的同时,读出数据库内信号参数装定卷积相关,可增加威胁雷达信号的发现距离;

- 自动扫描搜索相关,它使用 PRI 参数范围,按顺序装定于重频滤波器内,扫描变化 PRI 值和容差,当截获雷达信号后再进入跟踪状态。

5 结束语

试验证明,利用同步选通脉冲匹配的时间相关法,可提高雷达接收机的信噪比,可使雷达接收机侦收发现距离增加,叠加的噪声电压明显下降;也使等幅测向侦收方位的跳动范围减小。在同一体制的雷达接收设备中,时间相关卷积法比常用的数字采集处理法截获雷达信号的概率明显提高。

References(参考文献)

- [1] 李宏, 王国玉, 杨英科, 雷达信噪比的测量与计算, 电子对抗技术, 2002, 17 (2): P3-6 LI Hong ,WANG Guo-yu ,YANG Ying-ke, Measuring and Calculating of Radar SNR., Electronic Warfare Technology, 2002, 17 (2): P3-6
- [2] 刘大璐, 王俊, 弱小信号雷达目标的信噪比分析及提高方法. 电子测量技术, 2008(4): P68-71 Liu Da-lu, Wang Jun, Analysis of puny signal target's signal process method, Electronic Measurement Technology 2008 (4): P68-71
- [3] 陈传军, 基于采集相位的瞬时测频技术, 现代电子技术, 2008.31 (15): P168-170 CHEN Chuan-jun, The Technology of Instantaneous Frequency Measurement Based on Collecting Phase, Modern Electronics Technique, 2008.31 (15): P168-170
- [4] 陈传军, 噪声对瞬时测频接收机性能的影响, 金陵科技学院学报, 2004, 20 (3): P12-15 CHEN Chuan-jun. Hindrance of Noise on Instantaneous Frequency Measurement Receivers. Journal of Jinling Institute of Technology, 2004, 20 (3): P12-15
- [5] 陈传军, 数字电子设备抗干扰设计研究, 现代电子技术, 2005, 22: P107-109 CHEN Chuan-jun, Arithmetic Figure Electronics Equipments Antiinterference Design Research, Modern Electronics Technique. 2005, 22: P107-109
- [6] 陈传军. 侦收雷达信号虚拟声显示, 现代电子技术, 2006.01: P43-45 CHEN Chuan-jun, Fictitious Sound Displaying of Radar Signal, Modern Electronics Technique, 2006.01: P43-45