



专业综合课程设计

设计报告

课设题目： 基于 Swerling 目标模型的雷达信号检测
学 院： 信息科学与工程学院
专 业： 电子与信息工程
班 级： 1602503
姓 名： 张英豪
学 号： 160200432
指导教师： 王军

哈尔滨工业大学（威海）

2020 年 01 月 02 日

目录

一. 课程设计任务	1
二. 课程设计原理	1
1. 雷达截面积的起伏.....	1
2. SWERLING 起伏模型	1
3. SWERLING0~IV 型目标信号的产生.....	2
三. 课程设计方​​案	3
1. SWERLING V（0）型目标起伏信号的产生.....	3
2. SWERLING I 型目标起伏信号的产生.....	3
3. SWERLING II 型目标起伏信号的产生	4
4. SWERLING III 型目标起伏信号的产生	4
5. SWERLING IV 型目标起伏信号的产生.....	5
6. 门限的设定	6
7. 检测概率 P_D 的求解	6
四. 课程设计结果	6
五. 实验核心程序	7
六. 设计体会	9
七. 参考文献.....	10

一. 课程设计任务

产生不同类型的目标模型数据，按照虚警概率要求，对不同信噪比时的检测性能进行仿真，并分析仿真结果，给出结论。

设雷达为平方律检波，检波后进行 10 个脉冲的非相参积累然后进行信号检测。要求产生 Swerling0~IV 型目标信号，设噪声为高斯白噪声，要求对信噪比 SNR 在 $[-10\text{dB}:1\text{dB}:10\text{dB}]$ 变化范围内分别进行至少 10 的 5 次方次蒙特卡洛仿真，虚警概率为 10^{-6} 。根据仿真结果画出检测性能曲线（横坐标为 SNR, 信噪比按照 1dB 为步长而变化，纵坐标为检测概率 P_d ）。

二. 课程设计原理

1. 雷达截面积的起伏

对于一些复杂的目标，其雷达的截面积 σ 是视角和工作波长的复杂函数。尺寸大的复杂反射体通常可以近似分解为许多独立的散射体，在这样的条件下，总的雷达截面积就是各部分截面积的矢量和。各个独立单元的反射回波由于其相对相位关系，可以是相加的，给出大的雷达截面积，也可能是相减而得到较小的雷达截面积。对于复杂的目标，各散射单元是可以和工作波长相比的，因此当观察方向改变时，在接收机输入端收到的各单元散射的信号间的相位也在变化，使其矢量和相应改变，这就形成了起伏的回波信号。

要正确地描述雷达截面积的起伏，必须知道它的概率密度函数和相关函数。概率密度函数 $p(\sigma)$ 给出的目标截面积 σ 的数值在 σ 和 $\sigma + d\sigma$ 之间的概率，而相关函数则描述雷达截面积在回波脉冲序列间的相关程度。这两个参数都影响雷达对目标的检测性能。

2. Swerling 起伏模型

1) Sweling I 型起伏模型

接收到的目标回波在任意一次扫描期间都是恒定的（完全相关），但是从一次扫描到下一次扫描时独立的（不相关的），即目标为慢起伏。假设不计天线波束形状对回波振幅的影响，截面积 σ 的概率密度函数服从以下分布：

$$p(\sigma) = \frac{1}{\bar{\sigma}} e^{-\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}}, \quad \sigma \geq 0$$

式中， $\bar{\sigma}$ 为目标起伏全过程的平均值。上式表示 Swerling I 型按指数函数分布，即服从自由度为 2 的中心 χ^2 分布。

2) Swerling II 型起伏模型

目标截面积的概率分布与 Swerling I 型相同，但为快起伏，假定脉冲与脉冲间的起伏是统一独立的。

3) Swerling III 型起伏模型

慢起伏，截面积的概率密度函数为：

$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\bar{\sigma}^2} e^{-\frac{2\sigma}{\bar{\sigma}}}$$

式中， $\bar{\sigma}$ 为目标起伏全过程的平均值。上式表示 Swerling III 型服从自由度为 4 的中心 χ^2 分布。

4) Swerling IV 型起伏模型

目标截面积的概率分布与 Swerling III 型相同，但为快起伏，假定脉冲与脉冲间的起伏是统一独立的。

5) Swerling V (0) 型起伏模型

我们把目标截面积不起伏的目标模型称为 Swerling V (0) 型起伏模型。

3. Swerling0~IV 型目标信号的产生

首先，设目标信号的表达式为：

$$s(t) = Ae^{j\varphi}$$

则接收信号的瞬时功率表达式为：

$$P_s = A^2$$

由雷达距离方程：

$$P_s = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L}$$

可知：

$$A^2 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L}$$

由于上式右侧除 σ 外其他均为常量，所以 A^2 正比于 σ ，则 A^2 与目标截面积 σ 有相似分布。举例说明，若目标截面积起伏模型为 Swerling I 型，则 σ 服从指数分布，那么 A^2 也将服从指数分布。

由前提条件噪声为高斯白噪声，以及信噪比要求，再结合 A^2 的概率分布，即可求得幅度 A 的表达式。

对于信号的相位，我们这里假设接收信号相位概率分布为均匀分布。

求得信号的表达式后，再对信号掺杂以噪声，即完成 Swerling0~IV 型目标信号的产生。

三. 课程设计方案

假设，信噪比（以 dB 为单位）为 SNR，高斯白噪声为复噪声 $n_i + jn_q$ ，其实部虚部的方差为 σ^2 。

1. Swerling V (0) 型目标起伏信号的产生

由于信号为不起伏信号，则信号的平均功率为 A^2 。

由高斯白噪声的假设可知，其平均功率为 $2\sigma^2$ 。

则有关系式：

$$10^{\frac{SNR}{10}} = \frac{P_s}{P_N} = \frac{A^2}{2\sigma^2}$$

由此可得：

$$A = \sqrt{2\sigma^2 10^{\frac{SNR}{10}}}$$

加上信号的相位，即可得到最终信号 $s(t) = Ae^{j\varphi}$ 。在信号中混入高斯白噪声，即可得到目标起伏信号。

然后根据要求，进行平方律检波，然后进行 10 次非相参累加即得到最终信号。此后篇幅除必要外不再另外提到平方律检波和非相参累加的内容，具体内容将体现在 MATLAB 程序中。

2. Swerling I 型目标起伏信号的产生

信号为起伏信号，即为随机信号，那么其信号的平均功率应该为 $E[A^2]$ ，

而由上文可知， A^2 与 Swerling I 型目标截面积 σ 有相似分布，则 A^2 服从自由度为 2 的 χ^2 分布，即：

$$A^2 = \chi_1^2 + \chi_2^2$$

其中 χ 为均值为 0 的高斯随机变量，两边同时取均值，则：

$$E[A^2] = E[\chi_1^2] + E[\chi_2^2] = 2E[\chi_1^2] = 2E[\chi_2^2] = 2E[\chi^2]$$

由噪声平均功率为 $2\sigma^2$ ，信噪比为 SNR（dB）则有关系式：

$$10^{\frac{SNR}{10}} = \frac{P_s}{P_N} = \frac{E[A^2]}{2\sigma^2} = \frac{E[\chi^2]}{\sigma^2}$$

因为 χ 为均值为 0 的高斯随机变量所以有：

$$E[\chi^2] = \sigma^2 10^{\frac{SNR}{10}} = D[\chi]$$

由以上推导，可知，Swerling I 型的目标起伏信号的幅度 A 可由 MATLAB 代码，`sqrt(((sigs1*randn(1))^2)+((sigs1*randn(1))^2))` 得出，其中的 sigs1 即为上面所推导的 $\sqrt{E[\chi^2]}$ 也即是 $\sqrt{D[\chi]}$ 。

因为 Swerling I 型为慢起伏，在一次扫描期间是恒定的，而此处要进行 10 次非相干累加，则一次扫描为 10 个回波脉冲，由此可知，此处得到的幅度 A 在 10 次扫描中将是一个不变的值。

加上均匀分布的相位，即可得到最终信号 $s(t) = Ae^{j\varphi}$ 。

3. Swerling II 型目标起伏信号的产生

由上文原理分析可知，Swerling II 型与 I 型的区别就在于，II 型为快起伏，则脉冲与脉冲之间不相关，即 10 次回波脉冲中得到的信号幅度 A 应是不同的，由 MATLAB 代码：

$$\text{sqrt}(((\text{sigs1}*\text{randn}(1,10)).^2)+((\text{sigs1}*\text{randn}(1,10)).^2))$$

即可得到 10 个不相关的不同的幅度 A 并合并为一个 1×10 的行向量。

加上均匀分布的相位，即可得到最终信号 $s(t) = Ae^{j\varphi}$ 。

4. Swerling III 型目标起伏信号的产生

推导过程与 Swerling I 型类似。信号为起伏的随机信号，那么其信号的平

均功率应该为 $E[A^2]$ ， A^2 与 Swerling III 型目标截面积 σ 有相似分布，则 A^2 服从自由度为 4 的 χ^2 分布，即：

$$A^2 = \chi_1^2 + \chi_2^2 + \chi_3^2 + \chi_4^2$$

其中 χ 为均值为 0 的高斯随机变量，两边同时取均值，则：

$$\begin{aligned} E[A^2] &= E[\chi_1^2] + E[\chi_2^2] + E[\chi_3^2] + E[\chi_4^2] \\ &= 4E[\chi_1^2] = 4E[\chi_2^2] = 4E[\chi_3^2] = 4E[\chi_4^2] \\ &= 4E[\chi^2] \end{aligned}$$

由噪声平均功率为 $2\sigma^2$ ，信噪比为 SNR（dB）则有关系式：

$$10^{\frac{SNR}{10}} = \frac{P_s}{P_N} = \frac{E[A^2]}{2\sigma^2} = \frac{2E[\chi^2]}{\sigma^2}$$

因为 χ 为均值为 0 的高斯随机变量所以有：

$$E[\chi^2] = \frac{1}{2}\sigma^2 10^{\frac{SNR}{10}} = D[\chi]$$

由以上推导，可知，Swerling I 型的目标起伏信号的幅度 A 可由 MATLAB 代码：

```
sqrt(((sigs2*randn(1))^2)+((sigs2*randn(1))^2)+((sigs2*randn(1))^2)+((sigs2*randn(1))^2))
```

得出，其中的 sigs2 即为上面所推导的 $\sqrt{E[\chi^2]}$ 也即是 $\sqrt{D[\chi]}$ 。

因为 Swerling III 型为慢起伏，在一次扫描期间是恒定的，而此处要进行 10 次非相干累加，则一次扫描为 10 个回波脉冲，由此可知，此处得到的幅度 A 在 10 次扫描中将是一个不变的值。

加上均匀分布的相位，即可得到最终信号 $s(t) = Ae^{j\varphi}$ 。

5. Swerling IV 型目标起伏信号的产生

由上文原理分析可知，Swerling IV 型与 III 型的区别就在于，IV 型为快起伏，则脉冲与脉冲之间不相关，即 10 次回波脉冲中得到的信号幅度 A 应是不同的，由 MATLAB 代码：

```
sqrt(((sigs2*randn(1,10)).^2)+((sigs2*randn(1,10)).^2)+  
((sigs2*randn(1,10)).^2)+((sigs2*randn(1,10)).^2))
```

即可得到 10 个不相关的不同的幅度 A 并合并为一个 1×10 的行向量。

加上均匀分布的相位，即可得到最终信号 $s(t) = Ae^{j\varphi}$ 。

6. 门限的设定

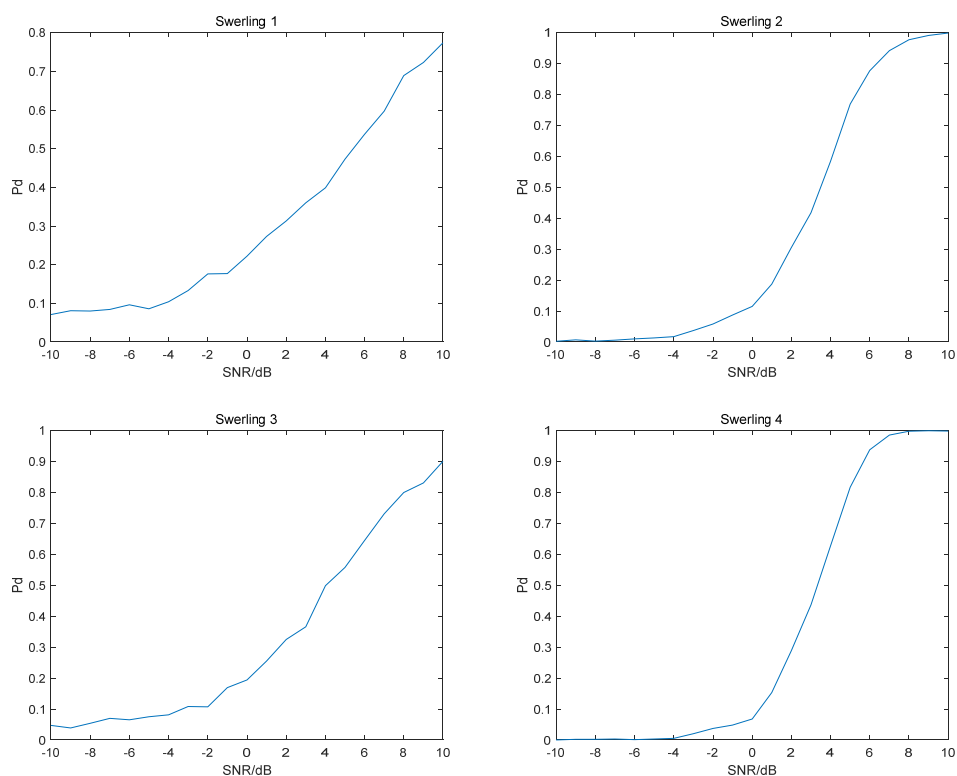
通过函数 $V_t = v_limit(N_p, P_{fa})$ 来求得门限的值。其中 V_t 为门限值， N_p 为非相参积累的次数， P_{fa} 为虚警概率。

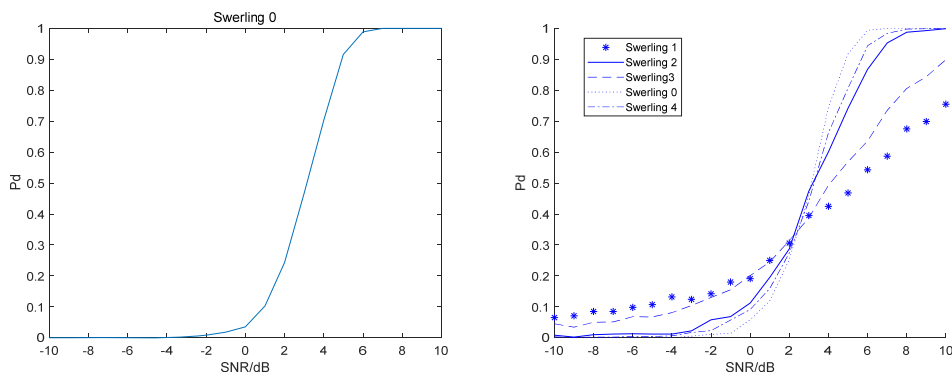
7. 检测概率 P_d 的求解

本设计对每一个信噪比 SNR 下都进行 1000,000 次蒙特卡洛循环，每次蒙特卡洛循环将得到的检波累加后的信号值与门限值比较，若超过门限，则判定为一次“检测到”，最终检测概率 P_d 为“检测到”的次数除以总次数，以频率逼近概率。

四. 课程设计结果

Swerling0~IV 型目标信号的检测性能曲线以及 5 种模型的检测性能曲线对比如下：





五. 实验核心程序

```
Pd0 = [];Pd1 = [];Pd2 = [];Pd3 = [];Pd4 = [];    %检测概率
Np = 10;%非相参积累的次数
Pfa = 1e-6;%虚警概率
Vt = v_limit(Np,Pfa);%求门限
N=100000;%蒙特卡洛循环的次数
%-----
%蒙特卡洛循环,
for Mc = 1:N    %循环次数为 N
%-----
%定义中间变量以及存储矩阵
    X0 = [];X1 = [];X2 = [];X3 = [];X4 = [];
    X0sum = [];X1sum = [];X2sum = [];X3sum = [];X4sum = [];
    S0 = [];S1 = [];S2 = [];S3 = [];S4 = [];
    A0 = [];A1 = [];A2 = [];A3 = [];A4 = [];
%-----
for Num = 0:20
    SNR = Num-10;% 信噪比
    %-----
    %设定噪声功率
    sig = sqrt(1/2); %噪声实部虚部的标准差
    sigs1 = sqrt((sig^2)*(10^(SNR/10)));
    sigs2 = sqrt((1/2)*(sig^2)*(10^(SNR/10)));
```

```

%-----
%Swerling 0
A0(Num+1,1) = sqrt(2*(sig^2)*(10^(SNR/10)));
S0(Num+1,:) = A0(Num+1,1)*exp(1i*2*pi*rand(1,Np));
X0(Num+1,:) = abs(awgn(S0(Num+1,:),SNR,'measured')).^2;
X0sum(Num+1,Mc) = sum(X0(Num+1,:));
if X0sum(Num+1,Mc) >= Vt
    Sum0(Num+1,Mc) = 1;
end
%-----
%Swerling 1
A1(Num+1,1) = sqrt(((sigs1*randn(1))^2)+((sigs1*randn(1))^2));
S1(Num+1,:) = A1(Num+1,1)*exp(1i*2*pi*rand(1,Np));
X1(Num+1,:) = abs(awgn(S1(Num+1,:),SNR,'measured')).^2;
X1sum(Num+1,Mc) = sum(X1(Num+1,:));
if X1sum(Num+1,Mc) >= Vt
    Sum1(Num+1,Mc) = 1;
end
%-----
%Swerling 2
A2(Num+1,:) = sqrt(((sigs1*randn(1,Np)).^2)+((sigs1*randn(1,Np)).^2));
S2(Num+1,:) = A2(Num+1,:).*exp(1i*2*pi*rand(1,Np));
X2(Num+1,:) = abs(awgn(S2(Num+1,:),SNR,'measured')).^2;
X2sum(Num+1,Mc) = sum(X2(Num+1,:));
if X2sum(Num+1,Mc) >= Vt
    Sum2(Num+1,Mc) = 1;
end
%-----
%Swerling 3
A3(Num+1,1) = sqrt(((sigs2*randn(1))^2)+((sigs2*randn(1))^2)+
((sigs2*randn(1))^2)+((sigs2*randn(1))^2));
S3(Num+1,:) = A3(Num+1,1)*exp(1i*2*pi*rand(1,10));
X3(Num+1,:) = abs(awgn(S3(Num+1,:),SNR,'measured')).^2;
X3sum(Num+1,:) = sum(X3(Num+1,:));

```

```

        if X3sum(Num+1,:) >= Vt
            Sum3(Num+1,Mc) = 1;
        end
        %-----
        %Swerling 4
        A4(Num+1,:) = sqrt(((sigs2*randn(1,Np)).^2)+((sigs2*randn(1,Np)).^2)+
        ((sigs2*randn(1,Np)).^2)+((sigs2*randn(1,Np)).^2));
        S4(Num+1,:) = A4(Num+1,:).*exp(1i*2*pi*rand(1,Np));
        X4(Num+1,:) = abs(awgn(S4(Num+1,:),SNR,'measured')).^2;
        X4sum(Num+1,Mc) = sum(X4(Num+1,:));
        if X4sum(Num+1,Mc) >= Vt
            Sum4(Num+1,Mc) = 1;
        end
    end
end
for i =0:20
    Pd0(i+1) = sum(Sum0(i+1,:))./(Mc);
    Pd1(i+1) = sum(Sum1(i+1,:))./(Mc);
    Pd2(i+1) = sum(Sum2(i+1,:))./(Mc);
    Pd3(i+1) = sum(Sum3(i+1,:))./(Mc);
    Pd4(i+1) = sum(Sum4(i+1,:))./(Mc);
end

```

六. 设计体会

在完成此课程设计的过程中，我对于信号与系统以及随机信号分析认识加深了。在之前学过这些课程后，我没有像这样认真做过与这些课程相关的实验和课程设计，所以感觉对这些知识的运用上还是不够熟练。在做这个课设的过程中，我甚至都忘记了实信号和复信号以及它们的随机信号如何计算功率，还是后来听老师讲过后又整理了一下才清晰。

其次，我觉得老师可以多给一些参考资料，据本次课设来说，仅用老师给的三本书还是很难在这样短的时间内完成的。本次课设也是多亏了老师答疑才能基本完成要求，感谢老师的细心讲解！

七. 参考文献

- [1] 丁鹭飞, 耿富录.雷达原理[M] .西安:西安电子科技大学出版社, 2006 .
- [2] Bassem R Mahafza, Atef Z Elshe rbeni.MATLAB Simulations for Radar Systems Design[M] .London:Chapman& Hall/C RC, 2003.
- [3] 毛云祥,王伟,李磊.基于目标模型的雷达干扰建模和分析[J].舰船电子对抗,2010,33(01):47-49+52.
- [4] 朱振军,林明,宋月丽.起伏目标下的非相参积累研究[J].计算机工程与应用,2014,50(02):208-211+230.