纵向延伸目标在噪声和混响中的检测

G. A. Van Der Spek

（荷兰 TNO 物理实验室）

一、导　言

脉冲压缩在雷达和声纳中的应用增加了这些系统的距离分辨能力。结果，距离分辨单元可能比要检测的目标的实际尺寸小得多。本文探讨了分辨能力的增加对于目标可检测性的影响。

一个目标假定可以划分成为几个独立的分辨元。每个分辨元的回波幅度遵照同样的瑞利分布。从一个目标反射回来的总能量与分辨能力无关。发射一个简单脉冲，反射信号的处理经过一个匹配滤波器、一个平方包络检波器，后面接一个积分器。积分器在目标回波全部持续时间内进行积分。

背景是正态白噪声或混响，混响在回波持续时间内是平稳的。我们将要研究，在上述两种情况下分辨能力变化所产生的影响；将要讨论积分损失和起伏抑制。

二、点目标的检测

首先考虑在正态白噪声中对非起伏的点目标（即一角形反射器）的检测。大家都知道，最佳处理器是一个匹配滤波器带一个包络检波器〔1〕。发射信号的能量是E，其带宽为B，发射能量中有r部分被接收。

检测质量只决定于信噪比rE/N_0，其中rE是接收到的回波能量，而N_0是噪声功率密度。在图1中，检测曲线（实线）给出在虚警概率$\alpha=10^{-3}$情况下检测概率P_d与信噪比的关系。

根据采样定理，带宽为B的信号可以用每秒$2B$个采样来表示。匹配滤波器的输出将要求这样的采样率。包络检波器把相位信息去掉，因此包络检波器的输出要求每秒B个采样，这相当于距离分辨单元为$1/B$秒〔2，3—6〕。若P_n是在匹配滤波器带宽B中的噪声功率，我们可以把噪声功率密度写为：$N_0=P_n/B=P_n\cdot 1/B$，就是在一个分辨单元中的噪声平均能量。因此信噪比是接收信号的能量与目标所在的分辨元的噪声能量之比。

在实际上，一个点目标对每个脉冲反射的信号能量不同。一个目标可想象为散射体的集合。由于发射—接收机的承载体与目标的相对运动和传播介质变化的影响，每个散射体对回声的贡献的相对相位在一次回声与另一次回声是不同的。因此，接收信号与发射信号能量的比r可以认为是一个随机变量。r的概率密度函数为指数分布（瑞利目标）。匹配滤波器及包

络检波器的性能可以通过把一个非起伏点目标的检测曲线按 $p_{\bar{r}}(r)=\frac{1}{\bar{r}}\exp\left(-\frac{r}{\bar{r}}\right)$ 加权平均而得，其结果见图1（虚线）。横轴的参数是平均信噪比，即平均接收信号能量与目标分辨元中平均噪声能量之比。比较这两条检测曲线可以看出，当$P_d>0.30$，由于主要在原检测曲线凹部取平均，目标起伏产生一起伏损失，这损失随P_d而增加。当$P_d<0.30$，有一小的起伏增益。

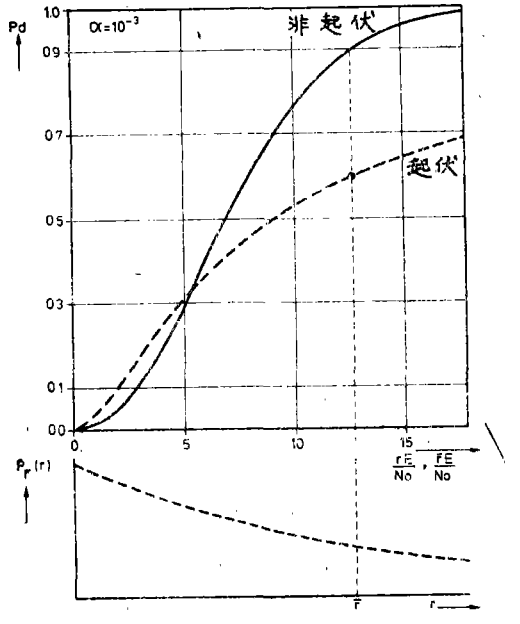


图1　在$\alpha=10^{-3}$情况下，非起伏和起伏的点目标的检测概率与平均信噪比的关系

当考虑在混响中检测时，使用一匹配滤波器和一包络检波器，这时信混比决定检测性能。每分辨元的平均噪声能量现在代之以每分辨元的平均混响能量

$$N_r=\rho E\ (v/2B)$$

其中，ρE是当发射能量为E的信号时接收到的每米平均混响量，v是声传播速度（米/秒），因此$v/2B$是分辨元的长度米数。平均信混比是

$$\frac{\bar{r}\,E}{N_r}=\frac{2\bar{r}B}{\rho v}$$

增加信号带宽B以增加分辨能力的效果在噪声和混响情况下是不同的。在目标比分辨元小的时候，信噪比不受带宽影响，而信混比却随B线性增加。

三、纵向延伸目标的反射

当增加带宽B使分辨元继续减小时，分辨元将会变得比目标要小。假设目标等效于n个分辨元

$$n=\frac{L}{v/2B}$$

其中L是目标的长度。在正态白噪声中检测一个含有n个同样的独立瑞利单元的目标基本上就和用n个不相干脉冲检测一个Swerling Ⅱ点目标一样〔1〕。众所周知，最佳检测器是一个匹配滤波器后面带一个平方包络检波器和线性积分器（图2）。

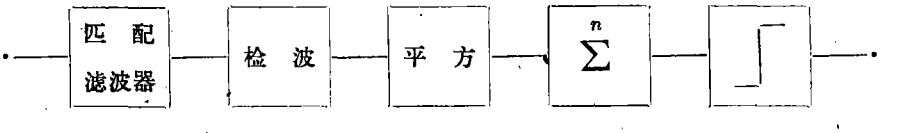


图2　正态白噪声中n单元目标的最佳检测器

经过包络检波器之后，每分辨元的平均信噪比是$\frac{\overline{(r/n)}E}{N_0}$，当分辨率提高时，这个量降低。因此当增加$n$时，每个单元的平均信噪比降低，而所积分的单元数增加。当考虑在混响中检测的时候，每单元的平均信混比是

$$\frac{\overline{(r/n)}E}{\rho E(v/2B)}=\frac{\overline{r}}{\rho L}$$

与噪声情况下平均信噪比的情况相反，平均信混比与发射信号能量无关，也与目标的分辨元数n无关。因此，增加分辨能力时，平均信混比不变，而所积分的分辨元数增加。

1．噪声中检测纵向延伸目标

现在让我们来首先考虑在噪声背景下增加分辨能力的实际结果。一个有启发性的办法是计算要保持和分辨单元与目标匹配($n=1$)时同样的检测质量所需的相对噪声功率密度$N_0(n)/N_0(1)$与分辨能力的关系。图3和4中示出在虚警概率为$\alpha=10^{-1}$、10^{-3}和10^{-6}时的结果。

如果目标小于分辨元，平均信噪比与分辨元大小无关，这时仅处理一个分辨元。这说明在$n=1$以下增加分辨能力对目标的可检

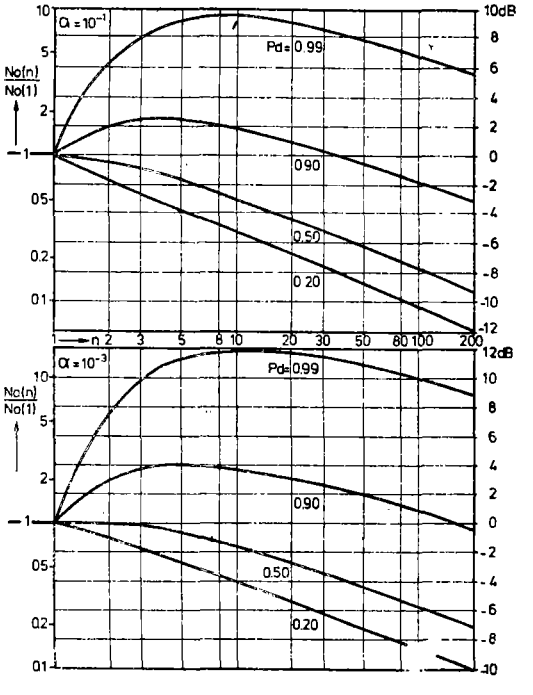


图3　在$\alpha=10^{-1}$、10^{-3}情况下，相对噪声功率密度与分辨元数目的关系

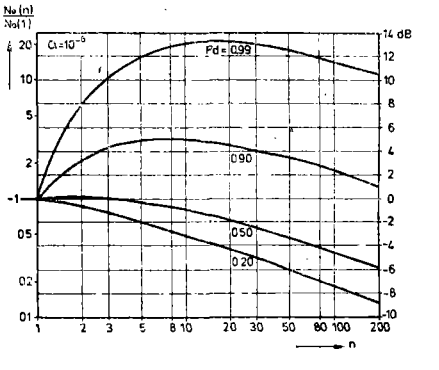


图4　在$\alpha=10^{-6}$情况下，相对噪声功率密度与分辨元数目的关系

测性没有影响。当分辨能力再增加时，每分辨元的平均信噪比随分辨元数n的增加而线性下降，这时也对n个分辨元进行积分。总的效应决定于检测质量：对于低的检测概率来说，当目标包含不止一个分辨元时，就有一个固定的恶化率；对于高的检测概率，同样的恶化率在更高的分辨能力下才出现。例如，在检测概率为0.90时，当目标长度超过一个分辨元时相应的噪声功率增加。最大噪声功率密度在$n=4$到$n=8$之间出现，这随虚警概率而变。性能的相应增益为2.5—5分贝。如分辨能力再增加，各曲线均有一同样的恶化率，分辨能力每增加一倍降低1.5分贝。

在增加分辨能力时的两种趋向一起始的改善与后来的恶化一是受起伏抑制与积分损失这

两种作用影响的结果。两种效应都将更详尽地加以讨论。

2．起伏抑制

在图 1 中示出当一个具有固定截面的 1 -分辨元目标变为指数分布截面的 1 -分辨元目标时出现什么情况。第二个曲线中的每一个点都可以从第一个曲线用目标反射能力的概率密度函数加权而得到。现在我们假设有一个n分辨元的起伏目标，回波信号的相位，除其起始值以外，是已知的。对于处理机而言，这就是说每个分辨元的回波可以相干积分，因此图 2 中的包络检波器和积分器可以互换，而平方器就无用了。

现在这包络检波器输出可设想为 1 -分辨元目标处理器的输出。由目标接收到的能量为wE，其中随机变量w与各分辨元的反射能力r_i的关系为

$$w=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n} r_i$$

随机变量 r_i是独立的，并且具有同样的指数分布。随机变量 w 的概率密度函数与 n 有关，$\overline{w}=\overline{r}$和$\sigma_w^2=\sigma_r^2/n$。检测曲线可以和以前一样从一个非起伏的 1 -分辨元目标检测曲线得到。在图 5 中示出$n=8$的权重曲线。

由于权重曲线（w的概率密度函数）的方差随n增加而降低，非起伏的 1 -分辨元目标性能曲线与相干处理的 n 分辨元目标性能曲线之间的差别随分辨能力增加而减小。这个效应叫做起伏抑制。

3．积分损失

前面假定回波信号的相位已知是不现实的，因为这是与多散射体目标的模型不相容的。实际上应该假定从每个分辨元来的回波相位是随机的。结果对整个目标分辨元不能有相干积分，而包络检波器必须设在积分器之前。处理链中的这个非线性部分产生所谓积分损失，实际上它是由包络检波器的非线性特性所引起的。

Davenpolt 和 Root〔3〕指出，任何 ν 次幂的包络检波器的输出信噪比在输入信噪比小时与它的平方成正比，而在输入信噪比大时和它成正比。这就是所谓的小信号抑制效应。这个关系见图 6。

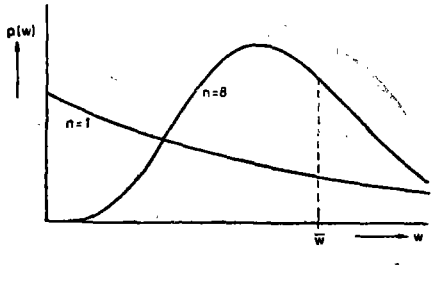


图 5　$w=\frac{1}{n}\sum_{1}^{n} r_i$的概率密度函数

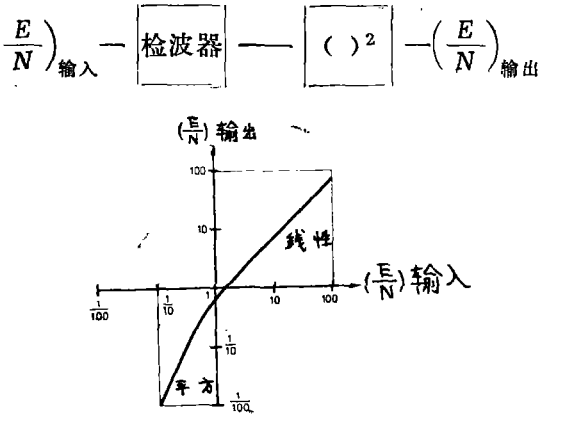


图 6　由于包络检波器产生的信噪比损失

要讨论这方面的影响首先考虑一个非起伏目标。分辨能力从 $n=1$ 起增加，首先送到包络检波器的采样是高信噪比的，至少检测概率是足够大的，虚警概率是足够小的。因此，在开始时由于检波器的非线性引起的损失是小的。再增加分辨能力时，包络检波器的输入信噪比降低，因此输出信噪比进入曲线的平方律部分。这里，分辨能力每增大 2 倍采样数也增大 2 倍，每个采样的输出信噪比降低 4 倍，因此积分后的输出信噪比降低 2 倍。当输入信噪比乘以$\sqrt{2}$时，输出信噪比变成原来那样。这相当于分辨能力每增大 2 倍要求输入信噪比增加 1.5分贝。

现在如假定是起伏目标，则上述两种效应都存在。当分辨能力由 $n=1$ 开始增加，首先平均输入信噪比是高的，所以积分损失小。在这里，特别是在高的检测概率条件下，起伏损失是重要的。继续增加分辨能力，起伏损失率降低，而积分损失增加，直到最后分辨能力每增加一倍，积分损失为1.5分贝。

4．在混响中检测纵向延伸目标

同一处理器，包括一个匹配滤波器、平方包络检波器和线性积分器，将用来分析在混响背景下分辨能力增加的影响。以前我们发现，起伏目标每分辨元的信混比是$\bar{\tau}/\rho L$，其中 $\bar{\tau}$ 表示接收信号能量与发射信号能量比的平均值，L 是目标长度，ρ 是接收到的单位长度混响散射能量与发射能量之比。当目标比距离分辨元小时，1-分辨元目标的信混比是$\dfrac{\bar{\tau}}{\rho(v/2B)}$。

既然 ρ 是混响强度的尺度，分辨能力对在混响中检测目标的影响可以通过计算要维持分辨元与目标匹配时（$n=1$）同样的检测质量所需的 ρ 值作为目标包含分辨元数的函数来求得。图 7 中示出一例。当目标不能被分辨开时，ρ随带宽线性增加，与所需的检测质量无关。

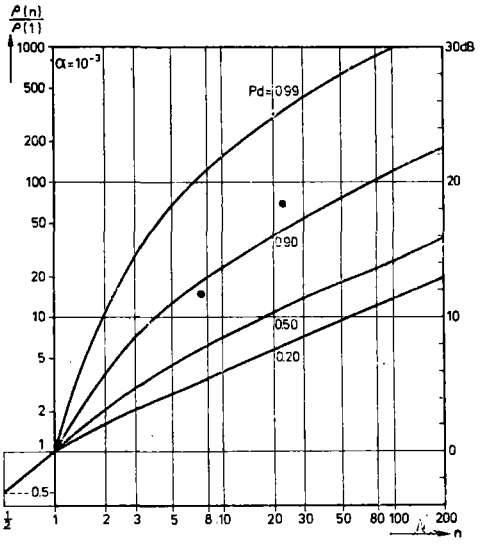


图 7　在$\alpha=10^{-3}$ 情况下，每米相对混响强度作为分辨单元数的函数

自 $n=1$ 以上，分辨元数增加而每分辨元的信混比不变。要使检测质量不变，$\rho(n)$ 可以按与选定的检测概率有关的斜率增长。如以前一样，起伏抑制与积分损失都要遇到。实际上只要增加一条斜率为 1 的直线，正态白噪声情况下的所有结果就都可以很容易地转化为混响条件下的结果。对于高的分辨能力，增长率约为每倍分辨能力增长1.5分贝。当然增长不是没有限制的。当分辨元变得太小，每个分辨元不能包含一定数量的散射体时，目标的模型就要失效。此外，还可能出现这样一种情况，即从其他分辨元得到的混响贡献会比目标分辨元的混响贡献要大。主要的限制就是噪声总是存在的，把每分辨元混响能量降到噪声能量密度之下是没有用处的。

可以有争论说，在混响中检测，匹配滤波器不是最佳的滤波器。它可以用一个恰当的失配滤波器代替，包括一个前置白化器和一个与被前置白化器处理过的信号匹配的滤波器。不

管怎样，当噪声背景是白的时，最佳信号频谱也是白的，匹配滤波器处理是最佳的〔4〕。当信号频谱不是白的时，最佳失配滤波器实际上产生一个比与匹配滤波器相应的距离分辨元为小的距离分辨元。这样就要对更大数量的分辨元积分，起伏抑制与积分损失也就要增加。实际上，在匹配滤波器条件下增加分辨元也将得到同样的结果〔5〕。

四、结　论

在正态白噪声中用单脉冲检测起伏目标时，分辨元存在一个最佳大小，这与所需的检测质量有关。当分辨能力再增加时，由对目标回波积分的起伏抑制所取得的增益将要被积分损失的增长所超过。

当考虑在混响中检测时，分辨能力可以增加到每分辨元的混响能量与噪声能量密度可以相比为止。

参 考 文 献

1. DiFranco, J. V. ahd Rubin, W. L. "Radar Detection", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. (1968).
2. Lawson, J. L. and Uhlenbeck, G. E. "Threshold Signals", Mc Graw-Hill, New York. (1950).
3. Davenport, W. B. Jr. and Root, W. L. "An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise", McGraw-Hill, New York. (1958).
4. Kooij, T. "Optimum Signals in Noise and Reverberation", In Proceedings of NATO Advanced Study Institute on Signal Processing. (1968).
5. Rihaczek, A. W. "Principles of High-resolution Radar", McGraw-Hill, New York (1969).
6. Van der Spek, G. A. "Detection of a Distributed Target," IEEE AES-7, PP. 922—931, 1971. 9.

討　論

T. G. Birdsall：如果你想把积分损失变为由包络检波器产生的损失，我要支持你。

P. M. Schultheiss：你能否确定，如果发射一个正弦波脉冲或一个扫频正弦波脉冲信号，纵向延伸的起伏目标将给出什么样的回波？

答：这决定于这些信号的分辨能力。如果使用一个足够短的正弦波脉冲，回波将是相位和包络都逐渐变化的正弦波。如果包络（和相位）的采样的间距大于发射脉冲的长度，则其采样将是独立的。持续时间相同的扫频正弦波的回波波形要复杂得多。它的包络将产生每秒B次的独立采样。

F.Wiekhorst：目标和混响都用同样的随机散射体模型来表示，在沒有多卜勒频移时，二者如何分辨出来？

答：要在混响散射体的背景中检测出散射体构成的目标，某些特性要有区别。在平稳混

响情况下，目标加背景的平均反射强度与只有背景的反射强度有区别。

P. H. Moose：你的目标模型确定每个分辨元的反射系数r_i随分辨能力增加而线性减小。你在这方面有沒有实验结果？

答：就我所知沒有相反的情况。不过我们沒有进行专门的实验来研究这点。在声纳和雷达中都要求更好的目标模型，我想实验数据将来也会有的。

G. Vettori：你是否假定你知道目标的长度，所以你能使积分时间和它匹配？你有沒有可以说明失配的影响的结果？

答：目标长度假定是已知的。失配的情况沒有研究过，但可以很容易在分析中列入。

H. Mermoz：一个目标可以考虑为一个线性滤波器。如果我们知道这个滤波器，我们可以造一个反滤波器。当然，当这个滤波器与入射角有关时，这是很难做的。我的意见是随机散射体目标模型是适当的，因为这肯定了我们对目标不了解这一事实。

答：或者你可以使用别种概率模型。作者在文献〔6〕中讨论过对本模型的一种修正，其中某些分辨元不包括任何散射体。另一种可能就是假定目标各单元反射强度有一定的分布（本模型中为均匀分布），也就是假定各分辨元有强有弱（有强反射点的目标）。

P. Raj：混响的多卜勒扩展对结果有什么影响？

答：本文中只考虑距离分辨问题。如果仅用扩展信号带宽来增加这分辨能力，而总的信号持续时间不变，则结果不受任何多卜勒扩展的影响。这是因为每米有效平均混响能量ρE是在目标多卜勒分辨元中每米距离混响能量，它不受影响。多卜勒分辨能力如果增加，这一个量就会减小。

（关定华译　尚尔冒校）