

机载预警雷达杂波模型

罗 毅, 刘国岁

(南京理工大学电光学院, 南京 210094)

摘 要: 本文用随机积分的方法引入一种合理的机载预警雷达的地(海)杂波模型. 由此得出正侧面阵阵元上的时空快拍是对一低通平稳随机过程的采样. 在距离环上杂波散射呈 Gauss 白噪声时, 可知杂波过程为低通 Gauss 平稳随机过程. 此外, 还讨论了一般的杂波过程的相关函数与功率谱密度. 并利用一组 Mountain Top 数据对本文建立的杂波模型做了相应的验证.

关键词: 时空二维信号处理; 机载预警雷达; 杂波

中图分类号: TN959.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 09-0117-03

Clutter Model for Airborne Early Warning Radar

LUO Yi, LIU Guo-sui

(Institute of Photo and Electronics of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This paper set up a clutter model for airborne early warning radar (AEW radar) with stochastic integral. By this model we realize that when array antenna is broadside, clutter process is a low-pass stationary process, and a snapshot obtained from array antenna is a sampled sequence of it. Under the hypothesis that clutter is Gaussian, we obtain the correlation function and power spectrum of clutter process. At the end of the paper, the model is verified by using the Mountain Top data.

Key words: STAP; airborne early warning radar; clutter

1 引言

机载预警雷达在军事上意义重大. 然而当雷达做下视时, 强烈的地海杂波对目标检测构成了极大威胁. 传统机载雷达的杂波抑制效果不很理想. 七十年代初 Reed 等人提出的时空二维自适应信号处理理论 (STAP)^[1] 为机载预警雷达的杂波抑制提供了一种新的、更为有效的途径.

设有一相干 PD 雷达从一个 N 元阵列天线上以脉冲重复周期 T 发射 M 个脉冲, 相应地, 从天线 N 个阵元上得到某一距离门上的 MN 个回波向量信号 X . 称 X 为该距离门上的一个时空快拍. STAP 可表述为如下的假设检验问题,

原假设 $H_0: X = N$, 备择假设 $H_1: X = S + N$.

其中, $N = X_c + X_w + X_i$. X_c 为地(海)杂波信号、 X_w 为接收机噪声、 X_i 为干扰、 S 为目标回波信号. 杂波信号中以地(海)杂波信号 X_c 为主. 杂波信号的研究对分析 STAP 的性能有极为重要的意义.

Klemm 曾给出过一个机载预警雷达杂波模型^[2,3]. 然而, 该模型在数学上过于粗糙, 理论分析中也难以使用. 其他‘点’反射杂波模型对于视野开阔、波束较宽的机载预警雷达也不适合. 以下为方便计简称地(海)杂波为杂波.

2 杂波模型

相对于观察范围而言, 机载雷达波长较短. 此时杂波呈现

为漫反射, 既来自不同区域的杂波散射应为独立的随机变量.

本文中假设天线为正侧面线阵且阵元无方向性, 其结果可以很容易地推广到面阵上去. 设在方位角为 θ 、高低角为 ϕ 的位置有一散射面 (参见图 1 中阴影处), 则 t 时刻 (相对于发射脉冲起始时刻) 坐标 u 处 (坐标系固定在天线上, 且正方向与飞行方向一致) 阵元接收到的该处散射回来的杂波信号为

$$C(\theta, \phi) \left(\exp \left\{ i \left(\frac{2\pi}{\lambda} u \cos(\theta) \cos(\phi) + \frac{4\pi V}{\lambda} t \cos(\theta) \cos(\phi) \right) \right\} \right) \cdot A(\theta, \phi) \exp(iB(\theta, \phi)) \quad (1)$$

式(1)中, V 是飞行速度、 λ 是波长、 $C(\theta, \phi)$ 是阵元上的复电压增益, 它由雷达方程决定^[4]. $A(\theta, \phi)$ 是随机幅度, 先假设其服从 Rayleigh 分布. $B(\theta, \phi)$ 是随机相位, 在此设其服从 $[0, 2\pi]$ 区间上的均匀分布, 则

$$A(\theta, \phi) \exp(iB(\theta, \phi)) = A(\theta, \phi) \cos B(\theta, \phi) + i A(\theta, \phi) \sin B(\theta, \phi) \quad (2)$$

设 $X_1(\theta, \phi) = A(\theta, \phi) \cos B(\theta, \phi)$ 、 $X_2(\theta, \phi) = A(\theta, \phi) \sin B(\theta, \phi)$, 则 $X_1(\theta, \phi)$ 、 $X_2(\theta, \phi)$ 是均值为零、方差相同且相互独立的正态随机变量. 从而 $A(\theta, \phi) \exp(iB(\theta, \phi)) = X_1(\theta, \phi) + i X_2(\theta, \phi)$ 是复正态随机变量. 由漫反射形成的物理机制, 可以认为距离环上不相交区域上散射的杂波信号是相互独立的. 故可以把 $A(\theta, \phi) \exp(iB(\theta, \phi))$ 看做是区间 $[0, \lambda]$ 上一个复 Gauss 独立增量过程 $W(\theta, \phi)$ 在 $[0, \lambda]$ 上的增量, 即

$$A(\theta, \phi) \exp(iB(\theta, \phi)) = W(\theta, \phi + \lambda) - W(\theta, \phi) \quad (3)$$

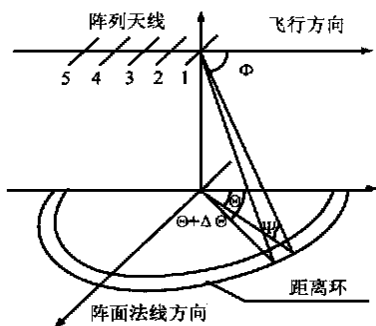


图1 机载雷达天线几何位置图

由于 PD 雷达发射的是相干脉冲, 且在一个相干处理间隔(CPI)内飞行平台的位移很小, 故假设一个 CPI 内无杂波起伏. 从而可以认为 \$t\$ 时刻、\$u\$ 坐标值处阵元上所接收的杂波信号作为距离环上各方向杂波漫反射的叠加. 不考虑距离模糊时, 该杂波信号可表示为下列随机积分的形式

$$X(u, t) = \int_0^{\pi} C(\cdot, \cdot) \exp \left\{ i 2 u \cos(\cdot) \cos(\cdot) \right. \\ \left. + \frac{4V}{2} \cos(\cdot) \cos(\cdot) \right\} dW(\cdot) \quad (4)$$

式(4)中的积分是随机积分, 其中, \$W(\cdot)\$ 是 \$[0, \pi]\$ 区间上的复 Gauss 正交增量过程. 令 \$s = u + 2Vt\$, 式(4)还可以表示为

$$X(s) = X(u, t) = \int_0^{\pi} C(\cdot, \cdot) \exp \left\{ i 2 (u + 2Vt) \cos(\cdot) \cos(\cdot) \right\} dW(\cdot) \quad (5)$$

$$= \int_0^{\pi} C(\cdot, \cdot) \exp \left\{ i s 2 \cos(\cdot) \cos(\cdot) \right\} dW(\cdot) \quad (6)$$

此时 \$X(s)\$ 的相关函数

$$R(s_1, s_2) = E(X(s_1) X(s_2)) = \int_0^{\pi} |C(\cdot, \cdot)|^2 \\ \exp \left\{ i 2 (s_1 - s_2) \cos(\cdot) \cos(\cdot) \right\} dF(\cdot) \quad (7)$$

其中, \$F(\cdot)\$ 是与 \$W(\cdot)\$ 相联系的增函数. 可见 \$X(s)\$ 是一平稳 Gauss 过程. 在此, 称 \$X(s)\$ 为杂波过程.

如果距离环上散射特性均匀, 则可以认为 \$W(\cdot)\$ 是 \$[0, \pi]\$ 区间上的复 Wiener 过程, 即 \$W(\cdot) = W_1(\cdot) + i W_2(\cdot)\$. \$W_1(\cdot)\$、\$W_2(\cdot)\$ 是 \$[0, \pi]\$ 区间上独立的实 Wiener 过程, 其中 \$W_1(\cdot) \sim N(0, \pi/2)\$、\$W_2(\cdot) \sim N(0, \pi/2)\$, 则 \$F(\cdot) = \cdot\$. 此时令 \$v = 2 \cos(\cdot) \cos(\cdot)\$, 则 \$\cdot = \arccos(\frac{v}{2 \cos(\cdot)})\$. 进一步有

$$R(\cdot) = R(t_1, t_2) = \int_{-2 \cos(\cdot)}^{2 \cos(\cdot)} \frac{|C(\arccos(\frac{v}{2 \cos(\cdot)}), \cdot)|^2}{\sqrt{\frac{2 \cos(\cdot)}{2} - v^2}} \exp(i v) dv, \\ = t_1 - t_2 \quad (8)$$

$$\text{令 } f(v) = \begin{cases} 0 & v \notin (-\frac{2 \cos(\cdot)}{2}, \frac{2 \cos(\cdot)}{2}) \\ \frac{|C(\arccos(\frac{v}{2 \cos(\cdot)}), \cdot)|^2}{\sqrt{\frac{2 \cos(\cdot)}{2} - v^2}} & v \in (-\frac{2 \cos(\cdot)}{2}, \frac{2 \cos(\cdot)}{2}) \end{cases}$$

(9)

$$\text{则 } R(\cdot) = \int_{-\frac{2 \cos(\cdot)}{2}}^{\frac{2 \cos(\cdot)}{2}} f(v) \exp(i v) dv \quad (10)$$

由式(8)可见 \$f(v)\$ 就是杂波功率谱密度.

即使当 \$A(\cdot)\$ 不服从 Rayleigh 分布时, 仍可以认定 \$W(\cdot)\$ 是 \$[0, \pi]\$ 区间上的零均值正交增量过程, 此时式(5)~(7)仍成立. 这说明本文建立的杂波模型在距离环上的杂波漫反射不服从 Gauss 白噪声时也依然成立, 且杂波功率谱密度为

$$f(v) = \begin{cases} 0 & v \notin (-\frac{2 \cos(\cdot)}{2}, \frac{2 \cos(\cdot)}{2}) \\ \frac{|C(\arccos(\frac{v}{2 \cos(\cdot)}), \cdot)|^2}{\sqrt{\frac{2 \cos(\cdot)}{2} - v^2}} & v \in (-\frac{2 \cos(\cdot)}{2}, \frac{2 \cos(\cdot)}{2}) \end{cases} \quad (11)$$

其中 \$m(x)\$ 是式(7)中 \$F(x)\$ 关于 Lebesgue 测度的 Radon-Nikodym 导数^[5]. \$m(x)\$ 的大小反映了距离环上各处杂波散射强度. 由于 \$f(v)\$ 有紧支撑, 所以 \$X(t)\$ 是一低通平稳过程^[5].

从式(11)中可看出, 当各距离环上 \$m(x)\$ 形态近似时, 在同一方向上, 远场不同距离门上的杂波过程 \$X(t)\$ 的相关函数 \$R(\cdot)\$ 除相差一常数因子外结构上是近似一致的. 这就为用相邻距离门上的二次数据 (secondary data) 估计被检测距离门上的杂波协方差矩阵的方法提供了理论上的依据. 用 \$R(\cdot)\$ 除 \$R(0)\$ 得到归一化的相关函数 \$R(\cdot)/R(0)\$. 图2、3给出了在正侧面线阵条件下不同观测方向的归一化的相关函数 \$R(\cdot)/R(0)\$ 及归一化的杂波功率谱的模.

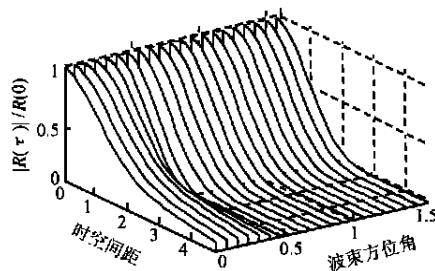


图2 天线波束指向不同时归一化相关函数的模

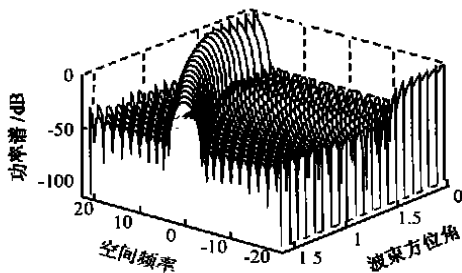


图3 天线波束指向不同时归一化杂波功率谱的模

图2、图3中发射阵为21个阵元 Chebyshev 加权的线阵, 阵元间距为 \$\pi/2\$, (\$\pi = 0.3\text{m}\$) 为载波波长. 图中波束方位角由零增至 \$\pi/2\$. 图2中时空距离为式(6)中的 \$s (= u + 2Vt)\$. 距离环上的杂波散射特性均匀.

3 阵元间信号的关系

为方便计, 以下不考虑距离模糊. 设 \$\cos(\cdot) = 1\$, \$W(\cdot)\$ 是 Wiener 过程, 阵元间距 \$d = \pi/2\$、阵元数为 \$N\$、脉冲重复周期为

T 、脉冲数为 M 。令在时刻 LT 、第 K 个阵元上的信号 $X_{K,L} = X((K-1)/2, (L-1)T)$ 。则 LT 时刻 N 个阵元上得到的杂波信号向量为

$$(X_{1,L} X_{2,L} X_{3,L} \dots X_{N,L})$$

可以认为上述杂波信号向量是对 $X(t)$ 在 N 个时刻的采样, 则

$$E(X_{m,L} X_{n,L}) = \frac{\left| C(\arccos(\frac{v}{v^2})) \right|^2}{\sqrt{2 - v^2}} \exp\{i(m-n)v\} dv \quad (12)$$

$$E(X_{M,m} X_{N,n}) = \frac{\left| C(\arccos(\frac{v}{v^2})) \right|^2}{\sqrt{2 - v^2}} \exp\{i \frac{4VT}{v} (m-n)v\} dv \quad (13)$$

式(12)、(13)分别给出了同一时刻 N 个阵元间及同一阵元 M 个脉冲间的相关函数的值。除非 $4VT/v = 1$, 两个方向相关函数的结构是不一样的。设

$$(X_{1,1} X_{2,1} \dots X_{N,1} X_{1,2} X_{2,2} \dots X_{N,2} \dots X_{N-1,M} X_{N,M}) \quad (14)$$

为某一距离环上的时空快拍。按 $nd + 2mVT$ 的大小将上述时空快拍 $\{X_{n,m}\}$ 重新排序得到

$$(X(1), X(2), \dots, X(NM)) \quad (15)$$

令 $R_{m,n} = E(X(m)X(n))$, 则 $R = (R_{m,n})_{MN \times MN}$ 是相应的协方差矩阵。事实上 R 与上述时空快拍的协方差矩阵相似。由式(13)可以看出若存在整数对 $(n_1, m_1), (n_2, m_2)$ 使

$$n_1/2 + 2m_1VT = n_2/2 + 2m_2VT, \text{ 则 } X_{n_1, m_1} = X_{n_2, m_2} a. e$$

也就是说 $(X(1), X(2), \dots, X(NM))$ 中有两个相邻的分量是相同的概率为一。这种相同实际上是这两个杂波信号时空等价。特别地, 当 $4VT/v = 1$, 既脉冲重复频率为最大杂波 Doppler 频率二倍时 $(X(1), X(2), \dots, X(NM))$ 中存在大量时空等价的分量, 此时杂波协方差矩阵的秩为 $N + M - 1$ 。

4 Mountain Top 数据分析

下面以 Mountain Top data t38pre01v1 数据为例验证本文的杂波模型。图 4、图 5 所示为归一化杂波相关函数的估计的模沿阵元、脉冲方向的变化。图中曲线的变化趋势与图 3 中利用杂波模型算出的相关函数的模的归一化曲线的变化趋势是一致的。还可以利用比较杂波谱的方法对这里的杂波模型进行验证^[7]。

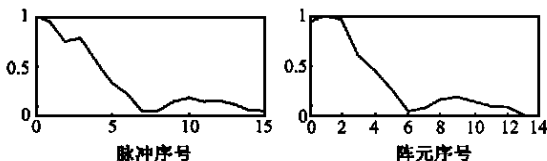


图 4 Mountain Top 实验中一组数据脉冲间的杂波相关函数的模

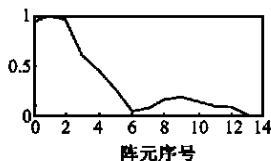


图 5 Mountain Top 实验中一组数据阵元间的杂波相关函数的模

5 结论

本文用随机积分的方法建立了一个正侧面阵机载预警雷达的杂波模型。当距离环上的杂波为正交增量过程时, 得出阵元上的时空快拍是对低通平稳过程 $X(t)$ 的采样。在距离环上杂波散射呈 Gauss 白噪声时, 给出了低通 Gauss 杂波过程的功率谱密度(参见式(9))。当距离环上杂波散射不是 Gauss 白噪声时, 本文在式(11)中给出了更为一般的结果。

另外, 无论是从理论计算还是从 Mountain Top 的数据分析来看, 时空间距在 10 个载波波长以上的两个时空脉冲的相关性已变得很弱了。

参考文献:

- [1] L. E. Brennan, I. S. Reed. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Trans., March 1973, AES-9(2): 237 - 251.
- [2] R. Klemm. Adaptive clutter suppression for airborne phased array radars [J]. IEE Pt. F, 1983, 130(1): 125 - 132.
- [3] R. Klemm. Adaptive airborne MTI: an auxiliary channel approach [J]. IEE Pt. F, 1987, 134(3): 269 - 276.
- [4] D. H. Johnson, D. E. Dudgeon. Arrays Signal Processing. Englewood Cliffs [M]. NJ, PTR Prentice Hall, 1993.
- [5] M. Loeve. Probability Theory [M]. 4th Edition, Springer-Verlag, New York, 1977.
- [6] Luoyi, Liu Guosui. Clutter model for airborne early warning radar [C]. Proc. of Int. Symposium on Noise Reduction for Imaging and Communication Systems. Tokyo, Japan, 1998.
- [7] 罗毅. 机载预警雷达杂波模型及降维 STAP 方法的研究 [D]. 南京理工大学博士学位论文, 1999, 10.

作者简介:



罗毅 1964 年出生, 南京理工大学光电学院电子工程技术研究中心博士生, 1988 年获陕西师范大学理学学士学位, 1991 年获西安交通大学理学硕士学位。感兴趣的领域为随机信号处理、阵列信号自适应处理、宽带通信理论和小波变换理论。



刘国岁 1933 年出生, 1953 年毕业于张家口通信工程学院, 现为南京理工大学光电学院教授、博士生导师, 中国电子学会会员, IEEE 高级会员, 纽约科学院院士, 中国电子学会无线电定位学会和信号处理分会理事。多年来从事噪声雷达的研制及神经网络、模糊系统、目标识别、阵列信号处理、连续波雷达和合成孔径雷达、混沌信号处理的研究。著有专著两本, 已在国内外发表论文 120 余篇。