

窄带相参雷达飞机目标的架次判别*

张汉华, 王伟, 陈曾平, 庄钊文

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要 针对窄带相参雷达不仅能够提供目标回波的幅度信息, 还可以提供回波的相位信息的特点, 提出了 MTMM 方法, 对编队飞机目标架次进行判决。实验证明, MTMM 方法为常规低分辨率相参雷达平台上编队飞机目标架次判别提供了一种解决问题的新途径, 具有重要的现实应用前景。

关键词 低分辨率雷达; 目标分类; 飞机编队

中图分类号: TN957.52 文献标识码: A

Classification of the Aircraft Formation Based on Low-resolution Radar

ZHANG Han-hua, WAN Wei, CHEN Zeng-ping, Zhuang Zhao-wen

(ATR Lab, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract A method named MTMM for classification of the aircraft formation is proposed, followed by studying the narrow-band signal with amplitude and phase. The results based on simulated data and measured data prove that it is a helpful method to classify the number of the airborne targets for low-resolution radar.

Key words low resolution radar; target classification; aircraft formation

传统雷达分辨率定义认为两个具有不同时间延迟的相同点目标, 其合成响应回波出现两个峰值, 则可以分辨这两个点目标, 出现两个峰值的临界点即为雷达对点目标的时间延迟分辨率^[1]。实际上, 雷达对目标的分辨, 重点不是雷达是否能“看”见两个点目标, 而是雷达能否在距离或多普勒频率上测量两个点目标。两个点目标的合成响应如果只出现一个峰值时, 又没有相应的相位信息, 是不能分辨它们的; 但是, 如果有相位信息, 情况可能就不同了^[2]。显然, 只要能测量点目标的位置, 即使合成响应只出现一个峰值, 也能区分是否是两个点目标的响应^[3]。

1 相互干涉点目标的位置测量

1.1 相位变形点与幅度极小值对

假设 N 个相互干涉散射体回波数据经过高斯加权, 无限时长没有经过采样。回波数据的 FT(傅氏)变换是 N 个互相干涉的散射体回波响应的总和^[4,5]:

$$K(f) = \sum_{j=1}^N a_j \exp[-b(f - f_j)^2 + j \cdot \phi_j] \quad (1)$$

(1) 式中 b 的值依赖于高斯加权的细节。由(1)式, 散射体回波响应的功率可写为^[4]:

$$P = \sum_{i,k=1}^N a_i a_k \exp\{-b[(f - f_i)^2 + (f - f_k)^2] + j \cdot (\phi_i - \phi_k)\} \quad (2)$$

设 $K(f)$ 幅度为 $A(f)$ 相位为 $\Psi(f)$ 则:

$$K(f) \equiv A(f) \exp[j\Psi(f)] \quad (3)$$

* 收稿日期 2004 - 12 - 10

基金项目 国家部委资助项目(4130304 - 01)

作者简介 张汉华(1975—),女,博士生。

由(3)式推出 这 N 个散射体响应的相位为:

$$2j\Psi = \ln[K(f)] - \ln[I^*(f)] \quad (4)$$

式中 $I^*(f)$ 表示 $K(f)$ 的复数共扼。

假设 $N=2$ 在相位变形点 ($d^2\Psi/df^2=0$) 有:

$$a_1 a_2 (f_1 - f_2) \times \sin(\phi_2 - \phi_1) \times (f_1 - f_2) \times \exp\{-b[(f - f_1)^2 + (f - f_2)^2]\} \\ \times \{a_1^2 \exp[-2b(f - f_1)^2] - a_2^2 \exp[-2b(f - f_2)^2]\} = 0 \quad (5)$$

(5) 式意味着 在相位变形点 两个散射体的回波幅度相同 即

$$a_1 \exp[-b(f - f_1)^2] = a_2 \exp[-b(f - f_2)^2] \quad (6)$$

且(6)式给出了一个散射体占优转变到另一个散射体占优时频率 f 的定义:

$$f_c = \frac{f_1 + f_2}{2} + \frac{\ln(a_1/a_2)}{2b(f_2 - f_1)} \quad (7)$$

令 $f = f_c + \delta$ 为特显点改变时频率偏移量) 检查功率极小值位置 ($dP/df=0$) 有:

$$a_1^2 \exp\{-2b[(f_c - f_1)^2 + 2\delta(f_c - f_1)]\} \times (f_c + \delta - f_1) + a_2^2 \exp\{-2b[(f_c - f_2)^2 + 2\delta(f_c - f_2)]\} \times (f_c + \delta - f_2) \\ + a_1 a_2 (2f_c + 2\delta - f_1 - f_2) \times \cos(\phi_1 - \phi_2) \times \exp\{-b[(f_c - f_1)^2 + (f_c - f_2)^2 + 2\delta(2f_c - f_1 - f_2)]\} = 0 \quad (8)$$

对纯粹相消干涉 $\phi_2 - \phi_1 = (2n+1)\pi$ ($n \in \mathbf{Z}$) (8) 式变为 (注意 f_c 满足(6)式):

$$\{\exp[2b\delta(f_1 - f_2)] - 1\} \times (f_c + \delta - f_1) + \{\exp[2b\delta(f_2 - f_1)] - 1\} \times (f_c + \delta - f_2) = 0 \quad (9)$$

由(9)式解出 $\delta=0$ 在特显优势转变时 幅度极小值和相位变形点在同一频率。

对非纯粹相消干涉 $\phi_2 - \phi_1 = \pi + \epsilon$ 近似有 $\cos\epsilon = 1 - \epsilon^2/2$ 代入(8)式 且将指数项在 $\delta=0$ 处 Taylor 展开 (保留 δ 的一次项) 整理后得:

$$\delta \approx \epsilon^2 \frac{f_c - (f_1 + f_2)/2}{2b(f_1 - f_2)^2 - \epsilon^2} \quad (10)$$

将(7)式代入(10)式 即从相位变形点推出了幅度极小值点的频率偏移量:

$$\delta \approx \frac{\epsilon^2 \ln(a_1/a_2)}{4b^2(f_2 - f_1)^2} \quad (11)$$

对非纯粹的相消干涉来说 (11) 式的频率偏移量 δ 很小。因此 幅度极小值点同时也是相位变形点 两个散射体强度近似相等。

对纯粹叠加干涉 $\phi_2 - \phi_1 = 2n\pi$ ($n \in \mathbf{Z}$) 同样也可以得出幅度极大值和相位变形点也在同一频率的结论 但是 对非纯粹的叠加干涉来说 频率偏移量 δ 不能近似为 0 这表示幅度极大值点不一定是相位变形点。

当 $N \geq 3$ 时 令 $d^2\Psi/df^2 = \alpha$ (相位变形点) 由于情形较复杂 (例如 $N=3$ 共有 81 种情况 去掉 $i=m$ 及 $i+m=n+k$ 这些为 0 的项后 还剩下 47 项) 难以得到如(5)式这样简单的解析表达式。

总结上面的分析 可以得出两个结论 (1) 对于两个互相干涉的散射体来说 相位变形点的位置就是幅度极小值的位置 即幅度极小值与相位变形点成对出现 (2) 对于三个以上互相干涉的散射体来说 不具有简单直观的特性。

1.2 两个相互干涉点目标的位置测量

假设强散射体的相位为 α (设归一化能量为 1) 弱散射体 (假设归一化能量为 a) 与强散射体之间的夹角 $\theta = \omega \cdot t + \phi$ (见图 1), 其回波为:

$$s(t) = 1 + a \exp[j(\omega \cdot t + \phi)] \quad (12)$$

合成矢量的幅度为:

$$A(t) = [1 + a^2 + 2 \cdot a \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi)]^{1/2} \quad (13)$$

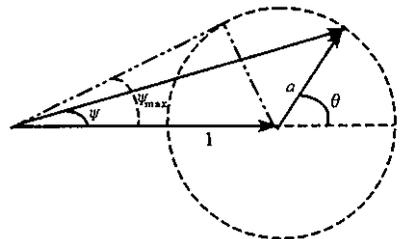


图 1 两个点散射体相位复(数)图

Fig. 1 Phasor diagram for two scatterers

合成矢量的相位为：

$$\Psi(a, \omega \cdot t + \phi) = \arctan \left[\frac{a \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)}{1 + a \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi)} \right] \quad (14)$$

定义幅度极小值 A_{\min} 与幅度极大值 A_{\max} 的比值为 a_{12} ,弱散射体的相对幅度为：

$$a = (1 - a_{12}) / (1 + a_{12}) \quad (15)$$

当 $\omega \cdot t + \phi = (2n + 1)\pi$ ($n \in \mathbf{Z}$) 时 ,相消干涉 ,设测量两个连续 A_{\min} 之间的时间为 t_{\min} ,可得散射体之间的间距：

$$\omega / 2\pi = \pm 1 / t_{\min} \quad (16)$$

测量两个连续的幅度极小值和相位变形点对之间的时间 t_{\min} 的值 ,由(16)式可以决定 $\omega / 2\pi$ 的值(注意未决定 ω 的符号)

合成矢量的相位最大值为：

$$\Psi_{\max} \equiv H = \arcsin a \quad (17)$$

合成信号相位跳跃可达到 $2 \cdot \Psi_{\max}$ 大小 ,且与弱散射体相对幅度 a 有关。测量相位极值点 ,根据相位极值来求出相位半跳跃大小 H ,利用(16)式决定散射体幅度之间的相对关系 ,解出 $a = \sin H$ 。

当合成矢量的相位达到最大值的时候 ,有：

$$\begin{cases} \omega \cdot t_{\Psi_{\max}} + \phi = 2n\pi + \pi/2 + H \\ \omega \cdot t_{-\Psi_{\max}} + \phi = 2n\pi + 3\pi/2 - H \end{cases} \quad (n \in \mathbf{Z}) \quad (18)$$

由(18)式 ,有：

$$t_{2H} = (1/\omega) (\pi \pm 2H) \quad (19)$$

因为实际信号相位解卷绕的方向可能刚好相反 (18)式表示相位跳跃 $2H$ 的大小 ,其时间宽度 t_{2H} 有两种可能。相位极值点之间的间距值 $(1/\omega) (\pi \pm 2H)$ 和相位半跳跃大小 H ,可以用来检验散射体间距 $\omega / 2\pi$ 的值。

假设强散射体相位不为 0 则(12)式为：

$$s(t) = \exp[-j(\omega_1 \cdot t + \phi_1)] + a \cdot \exp[-j(\omega_2 \cdot t + \phi_2)] = \{1 + a \cdot \exp[j(\omega \cdot t + \phi)]\} \exp[-j(\omega_1 \cdot t + \phi_1)] \quad (20)$$

合成后相位为：

$$\Psi_s(t) = \Psi(a, \omega \cdot t + \phi) - (\omega_1 t + \phi_1) \quad (21)$$

由上可得出三个结论 (1) 通过测量幅度极小值之间的间距 ,或等价意义上测量相位变形点之间的间距 ,可以得到散射体之间的位置间距 (2) 通过测量在幅度极小值时的相位跳跃大小 ,或等价意义上幅度极小值与幅度极大值的比率 ,可以得到两个散射体之间的相对幅度 (3) 通过测量幅度极值间相位的斜率信息 ,以及整个信号的相位斜率信息 ,可以定位散射体。

1.3 多个相互干涉点目标的 MTMM 测量方法

由于两个点散射中心的合成响应具有较好的测量特性 ,因此 ,可考虑将“多个点散射中心的一维位置特征提取”问题分解为一系列“两个点散射中心的一维位置特征提取”问题。通过对回波数据加窗滤波 ,分割成不同段 ,将每段数据去匹配两个散射体的模型 ,假如这种符合程度足够好 ,可以通过测量这些数据段 ,对多个散射体的位置进行估计 ,提取对响应有贡献的多个散射体的位置属性值(见图 2) ,因此也称该方法为 MTMM 方法

(Matching Two Model in More)

实际采集的编队飞机目标数据 ,不可避免受噪声影

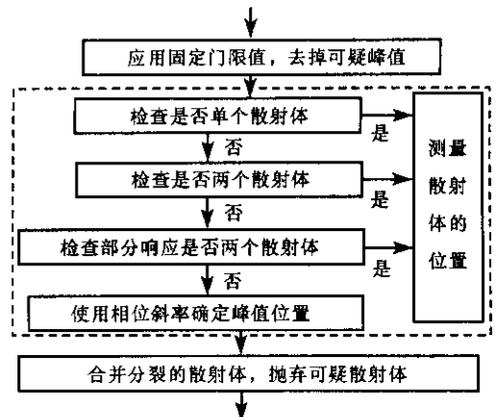


图 2 MTMM 测量方法

Fig. 2 The method of MTMM

响,可能钝化了幅度极值点和相位变形点。另外在对多架编队飞机目标回波进行分析前,需要先对数据进行分段,将多余不相干的干涉滤除,这种处理扭曲了理想情况下两个互相干涉的点目标的例子,使得幅度极值和相位变形点钝化。因此在测量回波的峰值响应是否符合两个散射体的模型时,必须注意尽可能满足下面四个条件:(1)幅度的极小值与相位变形点位置相同;(2)在幅度极小值中间应该有(且只有一个)幅度极大值;(3)幅度极小值的幅度水平相同;(4)相位变形点的相位跳变对称,两个相位变形点的相位与相位极值之间的相位差一样。注意,在对数据分段时,应该尽量在不影响感兴趣的响应的条件下,将第三响应滤除,一般选择窗体的边界,最好是相位跳变点和幅度极小值对。如果有一个极小值点不满足该条件,则以满足条件的另一个极小值点为数据间隔的边界之一,而以幅度极大值为对称中心,外推出数据间隔的另一个边界。

2 编队飞机目标的位置测量

实际数据采集中只获取了一批一架次与一批两架次的编队飞机目标的回波数据,所以下面用多目标的仿真数据,以及实测一批两架次飞机目标数据来验证 MTMM 方法的有效性。

2.1 仿真数据分析实验

仿真四个点目标,前后径向距离间隔分别为 150m,300m,150m,信号带宽 0.4MHz,采样频率为 1.0MHz,信噪比为 20dB。回波信号的幅度和相位见图 3(a)。图 3 的幅度经过归一化处理,相位为 2π 单位,其中图 3(a)和图 3(b)的横坐标对应距离门单元数(一个距离门单元指两个相邻采样点之间对应的距离间隔,这里为 150m)。图 3(c)的横坐标对应归一化的频率单位。图 3(c)的幅度和相位图上标记为“(1)”的是图 3(b)减去最小二乘线性拟合相位斜率(2.102)后的频谱图,标记为“(2)”的是测量属性值的重建图。从图 3(c)可以看出,它很好地满足两个散射体的测量模型:幅度曲线的形状吻合很好(因为滤波的影响,不考虑尺度的对比)左边极小值点都在 -0.40,右边极小值点都在 0.40;由于相位解卷绕的方向不同,图 3(c)的“(1)”和“(2)”的相位刚好相反,但相位跳变都是 0.19 个相位周期(一个相位周期等于 2π)。测量结果为:强散射体相对幅度为 0.640,位于 $(2.102 + 0.094) = 2.196$ 个距离门;弱散射体相对幅度为 0.360,位于 $(2.102 + 1.151) = 3.252$ 个距离门。两者相距 $(1.151 - 0.094) \times 150\text{m} = 158.55\text{m}$ 。对图 3(a)左边的峰值加窗滤波后进行相同的处理可以得到,一个散射体位于 -1.115 个距离门,一个位于 -0.051 个距离门,两者相距 174.9m,位于 -0.051 个距离门的与位于 2.196 个距离门的散射体之间相距 337.05m。

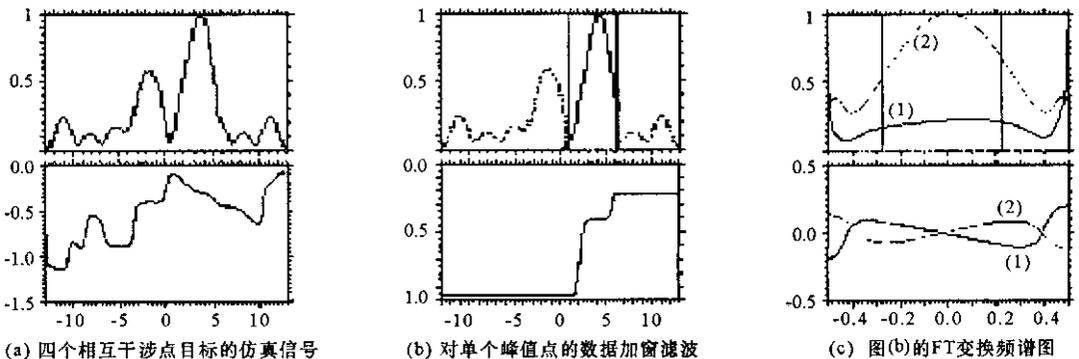


图 3 仿真四个相互干涉点目标的位置测量示意图

Fig.3 Using MTMM to measure position of four interfering scatters

2.2 实测数据实验与结果

图 4 为实测一批两架次飞机目标回波的幅度和相位图(雷达距离分辨率为编队间距的 2~3 倍),信噪比大于 20dB。图 4 的幅度同样经过归一化处理,其中,图 4(a)的横坐标对应距离门单元数,图 4(b)的横坐标对应归一化的频率单位,幅度和相位图上标记为“(1)”的是解除高斯加权后的频谱图,标记为“(2)”的是测量属性值的重建图。测量得到一个位于 -20.850 个距离门,一个位于 -34.980 个距离门,

两者相距 14.13 个距离门,判断为两架飞机目标。

2.3 实验结果分析

从上面实验结果来看,MTMM 方法对编队飞机之间间隔的测量存在一定的误差,但是误差值小于距离间隔值的 20%,不影响架次判别的结果,这说明 MTMM 方法对编队飞机目标的架次判决是有效的。

表 1 为某雷达站 2001 年某季短期内部分编队飞机目标回波的峰值情况。其中,编队架次 13、18、23、25 分别是对一批多架次连续跟踪多圈的统计结果;编队架次 1、2、3 分别是对不同机型大小混合编队不同批次的统计结果;其它编队架次是对几种机型不同编队下两、三批次连续跟踪多圈的统计结果。

表 1 某雷达站短期内编队飞机目标回波的峰值情况统计

Tab.1 The peaks of echo from aircraft formation (data from a radar station)

编队架次	统计数目	主峰数								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	21	21	-	-	-	-	-	-	-	-
2	32	33	9	-	-	-	-	-	-	-
3	25	13	6	6	-	-	-	-	-	-
4	35	10	14	8	3	-	-	-	-	-
5	24	1	1	20	1	1	-	-	-	-
6	40	-	13	24	-	-	3	-	-	-
7	34	-	14	-	20	-	-	-	-	-
8	28	17	2	3	6	-	-	-	-	-
9	20	-	5	-	15	-	-	-	-	-
13	12	12	-	-	-	-	-	-	-	-
18	23	-	-	-	-	-	11	12	-	-
23	32	-	-	-	-	-	11	10	11	-
25	37	-	-	-	15	11	-	-	7	9

从表 1 可见,除了非常特殊情况(表 1 中 13 架小飞机密集型战术编队),大多数情况下,一个主峰一般只包含 1~3 架飞机目标,因此 MTMM 方法可以满足大多数应用情况下的架次判别需求。

3 结论

根据实际低分辨相参雷达对编队飞机目标架次判别的应用需求,针对窄带相参雷达不仅能够提供目标回波的幅度信息,还可以提供回波的相位信息的特点,提出了 MTMM 方法,对编队飞机目标进行架次判决。在雷达不具备高分辨能力时,MTMM 方法为常规低分辨相参雷达平台上编队飞机目标架次判别提供了一种解决问题的新途径。该方法已应用于低分辨雷达目标识别样机系统中。

参考文献:

[1] 卡尔庞蒂埃 M.H. 现代雷达基础[M]. 吴明德,胡朝阳,译. 北京:电子工业出版社,1987.

[2] Rihaczek A.W, Hershkowitz S.J. Man-made Target Backscattering Behavior: Applicability of Conventional Radar Resolution Theory[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, AES-32(2).

[3] Rihaczek A.W, Hershkowitz S.J. Radar Resolution and Complex-image Analysis[M]. Artech House, Boston, London, 1996.

[4] Rihaczek A.W, Hershkowitz S.J. Theory and Practice of Radar Target Identification[M]. Norwood, MA: Artech House, 2000.

[5] 孙真真,陈曾平,庄钊文,等. 一种高频区复杂雷达目标二维散射的参数模型[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(4).

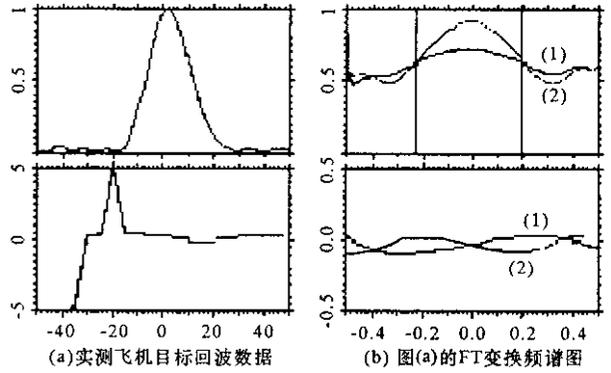


图 4 一批两架次飞机目标的位置测量

Fig.4 Using MTMM to measure position of two airborne

