doi:10.11887/j.cn.201702014　　http://journal.nudt.edu.cn

# 利用复单脉冲比的群目标存在性检测算法*

徐振海,王罗胜斌,刘兴华
(国防科技大学 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室,湖南 长沙　410073)

**摘　要**:详细推导单目标和群目标条件下单脉冲比的统计特性,根据其本质差异提出基于单脉冲比的群目标检测算法,在双目标条件下通过仿真分析了群目标检测性能与信噪比、目标角度间隔以及复幅度比之间的关系,得出了有益的结论。当小目标伴随大目标时不容易被检测出来;两个幅度相当的目标,相位差别越大越有利于群目标检测。群目标检测可以有效剔除"野值",为分辨与测量奠定基础。

**关键词**:群目标;存在性检测;单脉冲比
**中图分类号**:TN95　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-2486(2017)02-096-05

# Multiplicity detection of multiple unresolved targets using complex monopulse ratio

*XU Zhenhai*, *WANG Luoshengbin*, *LIU Xinghua*
(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics & Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract**: The statistical property of monopulse ratio was derived under the condition of single target and multiple unresolved targets. According to the inherent difference, the multiplicity detection algorithm was proposed using complex monopulse ratio. Taking two targets as an example, the detection performance was presented by Mont Carlo simulations, with respect to the SNR (signal to noise ratio), the angle interval and the complex amplitude ratio. Some meaningful conclusions are inferred qualitatively. When one target predominates, the detection performance is low. As for two comparative targets, the detection performance is improved with the increase of the phase difference. This algorithm can eliminate the outliers of estimated angle effectively and can lay the foundation for the resolution and measurement process of multiple targets.

**Key words**: unresolved targets; multiplicity detection; monopulse ratio

"单脉冲"[1]这个术语最早由贝尔实验室 Budenbom 于 1946 年提出,通过比较两个或多个同时天线波束的接收信号来获得精确的目标角度信息。该技术是一项相对成熟、但又在不断发展中的技术,不仅应用于跟踪雷达,以实现对目标的精密跟踪和测量[2],也应用于各种现代搜索雷达,以提高其测角精度。

通常单脉冲技术仅适用于单目标情况,当多个不可分辨的目标出现时,单脉冲输出的角度与任意目标均不对应,并且随着目标相对幅度和相位的变化而剧烈抖动,从而导致目标跟踪出现较大的误差甚至跟踪失败。所谓不可分辨目标是指在距离域、多普勒域和角度域均不能分辨的目标,也称为群目标。在雷达探测领域,群目标现象广泛存在,比如在反导过程中突防弹头、真假诱饵、干扰、弹体碎片等构成群目标;在防空过程中出现的飞机编队以及飞机加拖曳式诱饵等也构成群目标;理论上多径效应导致的镜像目标与真实目标也构成群目标;甚至复杂目标上的多个子散射体也可以看作群目标。

受到"污染"的测量值有可能比缺失的测量值对目标跟踪的危害更大,因此最现实、最迫切的工作是判断当前单脉冲测量角度是否可靠,或者说该角度来源于单目标还是群目标,该问题在学术上被称为群目标存在性判断问题,简称为群目标检测,特别要强调的是该"检测"不是目标发现的含义。群目标检测是下一步群目标分辨与测量的前提。

关于群目标检测问题,Sherman 最早在其博士论文[3]中提出利用复指示角虚部的检测思想,只要复指示角虚部(正交分量)超过门限就可以判断群目标存在,门限由虚警概率确定,但是文献

* **收稿日期**:2015-07-01
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(61471372)
**作者简介**:徐振海(1977—),男,河南卫辉人,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:drxzh930@sina.com

并没有给出设定门限的方法。文献[4]提出了多脉冲融合检测的思路,研究表明:中等信噪比条件下,利用多脉冲可以提高群目标检测的可靠性,并且随着目标起伏程度的下降群目标检测性能越好。文献[5]利用单目标和群目标条件下的扩展角来进行区分,求出了扩展角的统计分布,并根据虚警概率设置门限。当脉冲数为 1 时,与文献[4]方法相同。文献[6 - 7]中针对两个 Rayleigh 目标,提出了基于奈曼 - 皮尔逊准则的广义似然比检测算法,该算法不依赖信噪比和目标的角度。文献[8]系统地研究了低分辨雷达群目标检测与分辨技术,文献[9]进一步考虑了双/多基地情况,得出了有益的结论。

前人在群目标检测方面取得了丰硕的理论成果,然而上述算法都是在某些理论假设的前提下得出的,离雷达工程实践还有一定差距。比如假定目标雷达截面积(Radar Cross Section, RCS)服从某种分布,实际上单个脉冲回波为确定的未知数,即使在一个相干处理间隔(Coherent Processing Interval, CPI)期间,目标通常是不起伏或慢起伏的,因此文献研究往往是“长程”统计结果。本文以复单脉冲比为出发点,深入研究群目标存在性判决问题,利用复单脉冲比的实部和虚部,开发可工程化的群目标检测算法,针对双目标情况得出有益的结论。

## 1　单目标单脉冲比统计特性

首先给出单目标条件下单脉冲比公式,然后在大信噪比条件下得到单脉冲比的近似公式,最后根据和、差通道噪声特性求得单脉冲比的统计特性。

### 1.1　单脉冲比

假设单个目标位于单脉冲雷达波束指向附近,不考虑接收机热噪声时单脉冲比为:

$$\frac{\Delta}{\Sigma}=\frac{d}{s}=Ku \tag{1}$$

其中:$\Sigma$,$\Delta$ 分别表示和、差通道输出电压;$s$,$d$ 分别对应目标的和、差通道电压;$u$ 为目标角度;$K$ 为单脉冲斜率。可以看出:理想条件下单脉冲比为实数,并且在波束指向附近与目标角度呈线性关系。

考虑到和、差通道热噪声的存在,实际单脉冲比为:

$$\frac{\Delta}{\Sigma}=\frac{d+n_\Delta}{s+n_\Sigma} \tag{2}$$

其中:$n_\Sigma$,$n_\Delta$ 分别表示和、差通道热噪声。假定和、差通道热噪声服从零均值复高斯分布,并且相互独立,噪声强度均为 $\sigma^2$,即 $E[n_\Sigma]=E[n_\Delta]=0$,$E[n_\Sigma^* n_\Delta]=0$,$E[|n_\Sigma|^2]=E[|n_\Delta|^2]=\sigma^2$,其中 $(\cdot)^*$ 表示共轭运算。

由于热噪声的影响,实际单脉冲比出现了虚部,在实际应用中直接取单脉冲比的实部进行测角,即

$$\hat{u}=\frac{1}{K}\mathrm{Re}\left[\frac{\Delta}{\Sigma}\right] \tag{3}$$

根据式(2)直接求解单脉冲比的统计特性比较困难,下面对单脉冲比进行合理近似与简化。

### 1.2　单脉冲比近似

由式(2)可得:

$$\frac{\Delta}{\Sigma}=\frac{\Delta\Sigma^*}{|\Sigma|^2}=\frac{ds^*+n_\Delta s^*+n_\Sigma{}^* d+n_\Delta n_\Sigma{}^*}{|s+n_\Sigma|^2} \tag{4}$$

将式(1)代入式(4)可得:

$$\frac{\Delta}{\Sigma}=\frac{Ku|s|^2+s^* n_\Delta+Kusn_\Sigma{}^*+n_\Delta n_\Sigma{}^*}{|s+n_\Sigma|^2} \tag{5}$$

当和通道信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)很大时,单脉冲比近似为:

$$\frac{\Delta}{\Sigma}\approx\frac{Ku|s|^2+s^* n_\Delta+Kusn_\Sigma{}^*}{|s|^2} \tag{6}$$

考虑到热噪声信号相位的随机性,不妨令 $s$ 为实数,或者在复平面上以和信号矢量为参考,式(6)可简化为:

$$\frac{\Delta}{\Sigma}=Ku+\frac{n_\Delta+Kun_\Sigma{}^*}{s} \tag{7}$$

### 1.3　单脉冲比统计特性

根据和、差通道噪声统计特性可知,单脉冲比仍然服从复高斯分布,均值和方差分别为:

$$E\left[\frac{\Delta}{\Sigma}\right]=Ku \tag{8}$$

$$VAR\left[\frac{\Delta}{\Sigma}\right]=\frac{1+K^2u^2}{|s|^2}\cdot\sigma^2=\frac{1+K^2u^2}{SNR} \tag{9}$$

其中 $SNR=\dfrac{|s|^2}{\sigma^2}$ 为和通道信噪比。可以看出:单目标条件下单脉冲比的均值为实数;和通道信噪比越大,单脉冲比方差越小;目标角度越偏离波束指向,单脉冲比方差越大。

## 2　群目标单脉冲比统计特性

假设有 $M$ 个目标位于单脉冲雷达和波束主瓣之内,目标角度满足 $|u_m|<0.5u_{3\,\mathrm{dB}}$,$(m=1,\cdots,M)$,各个目标在和、差通道的电压分别为 $s_m$,$d_m$,并且 $d_m=Ku_m s_m$。和、差通道群目标回波电压分别为 $s=\sum_{m=1}^{M}s_m$,$d=\sum_{m=1}^{M}d_m=K\sum_{m=1}^{M}u_m s_m$。由于各个目标回波的相位不同相,根据平行四边形法则,群目

标条件下和信号与差信号不再保持同相或反相关系，此时：

$$\frac{d}{s} = K\frac{\sum_{m=1}^{M} u_m s_m}{\sum_{m=1}^{M} s_m} = K\bar{u} \tag{10}$$

其中 $\bar{u} = \dfrac{\sum_{m=1}^{M} u_m s_m}{\sum_{m=1}^{M} s_m}$ 为复指示角，受到群目标角度分布和相对复幅度的影响，复指示角可以为任意值。将式(10)代入式(4)可得高 SNR 条件下群目标单脉冲比近似为：

$$\frac{\Delta}{\Sigma} \approx K\bar{u} + \frac{n_\Delta + K\bar{u}n_\Sigma^*}{s} \tag{11}$$

因此，群目标条件下单脉冲比仍然服从复高斯分布，其均值和方差分别为：

$$E\left[\frac{\Delta}{\Sigma}\right] = K\bar{u} \tag{12}$$

$$VAR\left[\frac{\Delta}{\Sigma}\right] = \frac{1 + K^2 |\bar{u}|^2}{SNR} \tag{13}$$

可以看出：群目标条件下单脉冲比的均值为复数，出现了明显的虚部，该虚部主要是由于目标间的干涉造成的，这是与单目标情况最大的区别。

## 3 群目标检测算法

### 3.1 群目标检测建模

在上述分析的基础上，群目标检测问题可以描述为二元假设检验问题：

$$\begin{cases} H_0 : \dfrac{\Delta}{\Sigma} \sim CN\left(Ku, \dfrac{1 + K^2u^2}{SNR}\right) \\ H_1 : \dfrac{\Delta}{\Sigma} \sim CN\left(K\bar{u}, \dfrac{1 + K^2|\bar{u}|^2}{SNR}\right) \end{cases} \tag{14}$$

其中，$H_0$ 假设表示单目标，$H_1$ 假设表示群目标，“*CN*”表示服从复高斯分布。$H_0$ 假设条件下目标角度未知，$H_1$ 假设条件下群目标复指示角未知，该检测问题属于包含未知参数的复合假设检验问题，应该采用广义似然比检验[10]，即将未知参数的极大似然估计当作真值代入似然函数，再进行似然比检验，不过这样处理比较复杂。在兼顾单脉冲比实部的同时重点考虑单脉冲比虚部对群目标检测的贡献，因此将上述检测问题转化为：

$$\begin{cases} H_0 : \mathrm{Im}\left[\dfrac{\Delta}{\Sigma}\right] \sim RN\left(0, \dfrac{1 + K^2u^2}{2SNR}\right) \\ H_1 : \mathrm{Im}\left[\dfrac{\Delta}{\Sigma}\right] \sim RN\left(K\mathrm{Im}[\bar{u}], \dfrac{1 + K^2|\bar{u}|^2}{2SNR}\right) \end{cases} \tag{15}$$

其中“*RN*”表示服从实高斯分布。对于 $H_0$ 假设，高斯分布均值已知，并且为 0，方差依赖于目标角度，该角度可以用测量值代替；对于 $H_1$ 假设，均值和方差均是未知的。相对于式(14)，群目标检测问题简化了。

### 3.2 群目标检测算法流程

对于式(15)描述的检测问题，首先估计目标的角度值，然后根据虚部设定判决门限，由于群目标单脉冲比虚部可正、可负，因此不存在一致最大势检验[10]，只能采用双边检验。基于单脉冲比的群目标检测算法流程分为两步：

1)估计目标角度 $\hat{u}$，如果角度估计值超出和波束主瓣范围，称为“野值”，判断为“群目标”。

$$\left|\mathrm{Re}\left[\frac{\Delta}{\Sigma}\right]\right| \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \frac{Ku_{3\mathrm{dB}}}{2} \tag{16}$$

2)利用单脉冲比虚部进行判断，如果单脉冲比虚部超过标准差的 3 倍，判断为“群目标”。

$$\left|\mathrm{Im}\left[\frac{\Delta}{\Sigma}\right]\right| \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} 3\sqrt{\frac{1 + K^2\hat{u}^2}{2SNR}} \tag{17}$$

群目标检测算法相当于在单脉冲比复平面内画出一个判决域 $D_0$，如图 1 所示。当单脉冲比落入该区域内时判断为单目标，落入该区域外时则判断为群目标。在图 1 中“.”表示单目标的复单脉冲比分布，“*”表示群目标的复单脉冲比分布。

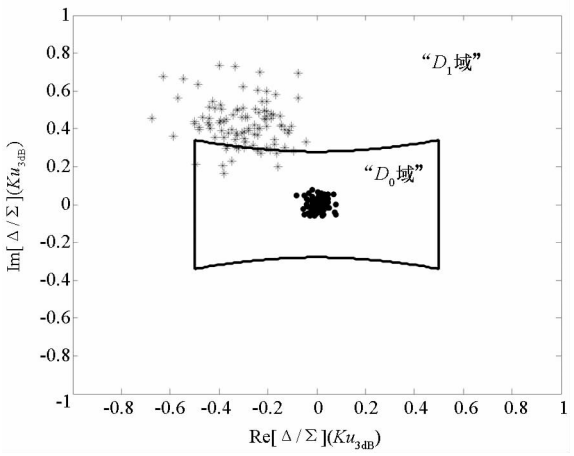



图 1 群目标检测判决域划分示意图

Fig. 1 Sketch map of judgment domain division for cluster targets

### 3.3 群目标检测性能

虚警概率的定义是单目标判断为群目标的概率，可以根据虚警概率设定判决域的门限，这里给

出了“3$\sigma$”标准,暗示着虚警概率为 $P_{fa}=0.0026$。检测概率的定义是群目标判断为群目标的概率,群目标检测概率与群目标的空间分布、回波间相对幅度和相位以及 *SNR* 有关。

$$P_d = 1 - \int_{x\in D_0} \frac{SNR}{\pi(1+K^2|\tilde{u}|^2)} \exp\left[-\frac{SNR(x-K\tilde{u})^2}{1+K^2|\tilde{u}|^2}\right] dx \tag{18}$$

## 4　群目标检测性能仿真

以阵列雷达单脉冲处理为例研究群目标检测算法的性能。阵列天线为均匀半波长线阵。阵元数 $N=16$,采用均匀加权,和波束宽度 $u_{3dB}=\frac{5.56}{N\pi}$,单脉冲斜率 $K=\frac{N\pi}{4}$。简单起见,设定群目标个数 $M=2$,此时复指示角为:

$$\tilde{u}=\frac{s_1u_1+s_2u_2}{s_1+s_2}=\frac{u_1+\rho u_2}{1+\rho} \tag{19}$$

其中 $\rho=\frac{s_2}{s_1}$ 为两目标复幅度比,不失一般性限定 $|\rho|\leqslant 1$。$\Delta u=|u_2-u_1|$ 为目标角度间隔。下面仿真分析群目标检测概率与信噪比、目标角度间隔以及复幅度比之间的关系。检测概率通过蒙特卡洛仿真得到,仿真次数为 1000。在研究检测概率与某一因素关系时,其他参数设定为典型值。

### 4.1　检测性能与 SNR 的关系

在该仿真实验中,设定复幅度比 $\rho=0.5e^{j\frac{2}{3}\pi}$,目标角度间隔 $\Delta u=0.2u_{3\,dB}$。图 2 给出了群目标检测概率与信噪比的关系曲线。

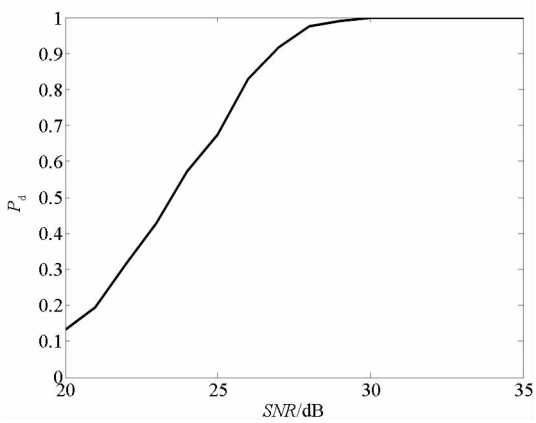



图 2　检测概率与 SNR 的关系曲线

Fig. 2　Curve of detection probability vs. SNR

可以看出:随着信噪比的提高,群目标检测概率也相应提高,这是一个普遍规律。在给定条件下,检测概率要想达到 0.9,信噪比必须大于 27 dB。

### 4.2　检测性能与角度间隔的关系

在该仿真实验中,设定复幅度比 $\rho=0.5e^{j\frac{2}{3}\pi}$,信噪比 $SNR=25$ dB。图 3 给出了群目标检测概率与角度间隔的关系曲线。

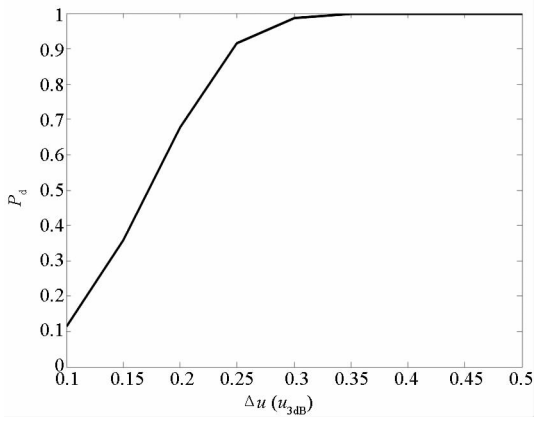



图 3　检测概率与角度间隔的关系曲线

Fig. 3　Curve of detection probability vs. angle interval

可以看出:随着目标角度间隔的增加,群目标检测概率也跟着提高;当两目标的角度间隔很小时,很容易判断为单目标。在给定条件下检测概率要想达到 0.9,角度间隔必须大于 0.25 倍波束宽度。

### 4.3　检测性能与复幅度比的关系

在该仿真实验中,设定信噪比 $SNR=25$ dB,目标角度间隔 $\Delta u=0.2u_{3\,dB}$。图 4 给出了群目标检测概率与复幅度比的关系曲面。

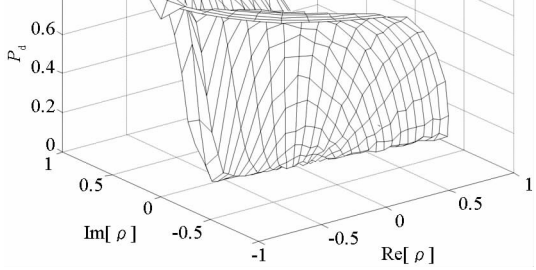



图 4　检测概率与复幅度比的关系曲面

Fig. 4　Surface of detection probability vs. complex ratio

可以看出:当两目标回波功率差别较大时,即 $|\rho|<0.5$,无论其相对相位如何,群目标检测概率都很低,也就是说当小目标伴随大目标时不容易被检测出来;当两目标回波功率相差不大时,即 $|\rho|>0.5$,如果相对相位差较小时,即 $|\phi_\rho|<$

π/3,也不易被检测出来,也就是说两个幅度相当的目标,相位差别越大越有利于群目标检测。

## 5 结论

本文详细推导了单目标和群目标条件下单脉冲比的统计特性,找出了其本质差异,提出了基于复单脉冲比的群目标检测算法,在双目标条件下通过仿真分析了群目标检测性能与信噪比、目标角度间隔以及复幅度比之间的关系,得出了有益的结论。当小目标伴随大目标时不容易被检测出来;两个幅度相当的目标,相位差别越大越有利于群目标检测。实际上,群目标条件下复指示角虚部有可能接近0,此时雷达将误判为单目标,本文提出的算法失效,需要开发利用其他信息。

群目标检测算法可以有效剔除"野值",并且为分辨与测量奠定基础。在实际应用时,可以用单脉冲比的实部去测角,用虚部来检测测角结果;当检测结果为群目标时,该角度测量结果不可信,应当舍去。此时雷达应采取其他处理措施,比如采取对称差波束单脉冲[11]或双零点单脉冲[11]测角方法测量每个目标的角度,或者增加信号带宽在距离维将其区分,并启用多目标跟踪处理。

## 参考文献(References)


[1] Sherman S M, Barton D K. Monopulse principles and techniques[M]. 2nd ed. Norwood: Artech House, 2011.

[2] 王德纯, 丁家会, 程望东. 精密跟踪测量雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
WANG Dechun, DING Jiahui, CHENG Wangdong. Precision tracking and measurement radar technologies [M]. Beijing: Electronic Industries Press, 2006. (in Chinese)

[3] Sherman S M. Complex indicated angles in monopulse radar[D]. Pennsylvania, USA: University of Pennsylvania, 1965.

[4] Asseo S J. Detection of target multiplicity using quadrature angle[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1981, AES-17(2): 271-280.

[5] Bogler P L. Detecting the presence of target multiplicity[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1986, AES-22(2): 197-203.

[6] Blair W D, Brandt-Pearce M. Detection of multiple unresolved rayleigh targets using quadrature monopulse measurements [C]//Proceedings of the 28th Southeastern Symposium on System Theory, 1996: 285-289.

[7] Blair W D, Brandt-Pearce M. Unresolved rayleigh target detection using monopulse measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 543-552.

[8] 李朝伟. 低分辨雷达对群目标的检测及分辨研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.
LI Chaowei. Detection and discrimination of unresolved targets of the low resolution radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)

[9] 闵涛. 双/多基地雷达密集多目标探测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
MIN Tao. Multiple unresolved targets detection techniques using bistatic/multistatic radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)

[10] Kay S M. 统计信号处理基础——估计与检测理论[M]. 罗鹏飞, 张文明, 译. 北京:电子工业出版社, 2006.
Kay S M. Foundations of statistics signal processing—estimation and detection theories [M]. Translated by LUO Pengfei, ZHANG Wenming. Beijing: Electronic Industries Press, 2006. (in Chinese)

[11] 徐振海, 肖顺平, 熊子源. 阵列雷达低角跟踪技术[M]. 北京:科学出版社, 2014.
XU Zhenhai, XIAO Shunping, XIONG Ziyuan. Low angle tracking technologies for array radar [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)