

一种SAR分布目标可分辨概率精确计算方法

王岩飞^① 陈新星^{*①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 可分辨概率是用来衡量SAR分布目标分辨特性的重要指标。该文在细化目标可分辨条件的基础上, 结合SAR分布目标统计特性, 提出一种新的目标可分辨判断准则, 给出一种可分辨概率精确计算方法。同时为了简化计算, 给出计算复杂度更小的近似计算方法。仿真结果表明, 该文提出的可分辨概率计算方法符合实际情况, 能够更真实地反映SAR分布目标统计特性对分辨特性的影响, 可为SAR图像质量评估和系统参数设计等提供理论支撑。

关键词: SAR; 分布目标; 可分辨概率; 统计特性; 反射强度

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)12-2848-06

DOI: 10.11999/JEIT180294

A Precise Method for Calculating the Resolution of SAR Distribution Targets

WANG Yanfei^① CHEN Xinxing^{①②}

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The separable probability is a significant criterion to evaluate the resolution characteristics of SAR distribution targets. On the basis of refining the separable condition of targets and taking the statistic characteristic of SAR distribution targets into consideration, a new separable judgment criterion for targets is proposed, and a precise calculation method of the separable probability is deduced. Besides, in order to simplify the calculation, the approximate calculation method with less computational complexity is presented. It is shown in the simulation results that the proposed method is in accordance with the actual situation, which can reflect the effect of the statistic characteristic of SAR distribution target on the resolution characteristic, and can provide theoretical support for the SAR image quality evaluation and system parameter design.

Key words: SAR; Distributed targets; Separable probability; Statistical properties; Reflective intensity

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波传感器, 广泛应用于地质、气象、资源探查、战场侦察等各个学科领域^[1,2]。SAR图像的空间分辨率是SAR图像质量评估的重要指标, 表征了SAR系统区分目标和获取信息的能力^[3]。传统的SAR图像分辨率评价方法认为分辨率

只与系统参数有关, 经典的评价指标是点目标冲激响应函数的3 dB主瓣宽度^[4-6]。然而已有研究表明, 单个点目标的分辨率评估方法并不能有效地表示SAR系统的分辨性能, Rihaczek^[7]认为应该综合考虑两个点目标的幅度和相位差对分辨率的影响, 并提出功能分辨率的概念。在此基础上, Zhang等人^[8]定量研究了两个点目标的幅度和相位差对分辨率的影响, 求得了两个相等幅度点目标完全可分辨的最短距离。之后Mir等人^[9]研究了两个不同幅度点目标的空间分辨率, 建立了分辨率与目标幅度比的关系, 然而该方法忽略了相位差对分辨率的影响。

SAR分布目标图像的信号由大量散射体回波相干叠加而成, 信号的幅度和相位有一定的随机性, SAR图像的分辨特性无疑是与目标的统计特性相关的。因此, 在评估SAR分布目标图像的分辨率时,

收稿日期: 2018-03-28; 改回日期: 2018-08-13; 网络出版: 2018-09-03

*通信作者: 陈新星 chen_xinxing93@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471340), 国家重点研发计划(2017YFB0503001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471340), The National Key Research and Development Program (2017YFB0503001)

不仅需要系统带宽等参数，还需要考虑目标本身的统计特性。针对这一问题，文献[10]将分布目标的统计特性与两个点目标的可分辨条件结合起来，提出可分辨概率的概念，并用于评价SAR图像的分辨特性。文献[11]结合分布目标多视图图像的统计特性与可分辨概率模型，研究了分布目标分辨特性与多视数之间的关系。上述方法在计算可分辨概率时，是将两个目标中点作为参考点，从而建立两个目标可分辨时幅度与相位差的约束关系，通过对分布目标统计特性积分求得可分辨概率。然而，分布目标信号的幅度和相位是随机变量，当两个目标的幅度不相等时，叠加后两个目标间信号幅度最小值的位置会偏移两个目标的中点位置。从理论上而言，更为精确的可分辨概率计算方法应该以实际的最小值位置为参考点。本文的主要工作就是围绕着精确获取SAR分布目标的可分辨概率，开展详细的研究分析，实现对SAR分布目标图像分辨特性的准确评估。

后文，首先从SAR分布目标复散射信号的形成过程出发，研究了SAR分布目标图像中相邻两个分辨单元关于归一化幅度比和相位差等参数的概率分布。在此基础上，针对可分辨概率计算过程中最小值位置点变化的问题，提出一种新的分布目标可分辨判断准则，并由此得到两个目标可区分的约束关系，最终获得可分辨概率的精确结果。同时，为了简化计算，还给出了一种计算复杂度更小的近似计算方法。

2 分布目标的可分辨特性分析

2.1 SAR分布目标统计特性分析

在SAR系统中，分布目标的回波信号由一个分辨单元内众多散射体所反射的电磁波相干叠加而成，因此，雷达接收的信号 S 可以表示为

$$S = \sum_k V_k \exp(j\varphi_k) \quad (1)$$

其中， V_k 和 φ_k 分别表示第 k 个散射体回波信号的幅度和相位。将式(1)改写为幅度和相位以及实部和虚部的形式如式(2)

$$S = u \exp(j\phi) = S_R + jS_I \quad (2)$$

其中， u 和 ϕ 分别表示雷达接收信号的幅度和相位， S_R 和 S_I 分别表示接收信号的实部和虚部。在完全发展相干斑条件下， u 和 ϕ 分别服从瑞利分布和均匀分布[12]，表达式为

$$p(u) = \frac{u}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right), u \geq 0 \quad (3)$$

$$p(\phi) = 1/2\pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (4)$$

其中， σ 表示目标的后向散射系数。在SAR分布目标图像中，由于两个相邻分辨单元信号 S_1 和 S_2 满足Goodman假设[13]，则 S_1 和 S_2 的联合概率密度函数如式(5)所示[11]。

$$f(v, \phi, \rho, n) = \frac{(1 - \rho^2)^n \Gamma(2n) v^{2n-1}}{\pi(1 + v^2)^{2n} \Gamma(n) \Gamma(n)} \cdot {}_2F_1 \left[1, n + \frac{1}{2}; \frac{1}{2}; \frac{4\rho^2 v^2 \cos^2 \phi}{(1 + v^2)^2} \right] + \frac{n \cdot 4^n \rho (1 - \rho^2)^n \cos \phi v^{2n}}{\pi(1 + v^2)^{2n+1}} \cdot {}_1F_0 \left[n + 1; ; \frac{4\rho^2 v^2 \cos^2 \phi}{(1 + v^2)^2} \right] \quad (5)$$

其中， v 表示多视图图像中相邻两个分辨单元信号关于后向散射系数的归一化幅度比， $F(\cdot)$ 为超几何函数， n 为多视数， ρ 为分辨单元间的相关系数， $\phi = \phi_1 - \phi_2$ 表示目标间的相位差。

2.2 可分辨概率计算方法

SAR分布目标图像中相邻两个分辨单元的中心位置分别为 R_1 和 R_2 ，可以将其看做两个强度不等的点目标，假设单个点目标回波信号的脉冲压缩结果为高斯函数，则相邻两个点目标信号的脉冲压缩结果可以表示为

$$f_i(r) = \delta_i e^{-\beta(r-R_i)^2} = A_i^2 e^{-\beta(r-R_i)^2}, i = 1, 2 \quad (6)$$

其中， δ 表示目标的反射强度， A 表示目标的幅度， r 为距离变量。 β 可以通过假设式(6)的3 dB带宽为 $c/2B$ 求得[9]， c 为光速， B 为系统带宽，如式(7)所示。

$$\beta = \ln 2 \cdot (4B/c)^2 \quad (7)$$

则在脉冲压缩前两个点目标的叠加信号表达式为

$$s(r) = \sqrt{f_1(r)} e^{j\phi_1} + \sqrt{f_2(r)} e^{j\phi_2} \quad (8)$$

其中， ϕ_1 和 ϕ_2 为两个点目标的相位。取两个点目标中点位置为坐标原点，令目标间距离为 L 且 $R_2 > R_1$ 。对式(8)取模的平方可以得到两个点目标叠加信号脉冲压缩的结果，如式(9)所示

$$I(r) = \|s(r)\|^2 = A_1^2 e^{-\beta(r+L/2)^2} + A_2^2 e^{-\beta(r-L/2)^2} + 2A_1 A_2 e^{-\beta(r+L/2)^2/2} e^{-\beta(r-L/2)^2/2} \cos(\phi) \quad (9)$$

其中， $\phi = \phi_1 - \phi_2$ 表示两个点目标的相位差。

在不考虑SAR系统失真的情况下，如果两个相邻点目标可分辨，则要求两个目标中点位置处亮度不大于目标亮度的 k 倍[10]。这一判别准则认为两个目标叠加信号 $I(r)$ 在两个目标之间的最小值为 $I(0)$ ，即最小值的位置为两个目标的中点，因此目标可分辨的条件为

$$\frac{I(0)}{I(R_1)} \leq k, \frac{I(0)}{I(R_2)} \leq k, k < 1 \quad (10)$$

假设相邻两个分辨单元的后向散射系数相同^[10], 则由式(5)可知归一化幅度比为

$$v = A_1/A_2 \quad (11)$$

结合式(9), 式(10)和式(11)可以得到两个点目标可分辨时信号幅度比和相位差的约束关系为

$$\begin{aligned} & \left(k - e^{-\beta L^2/4}\right) v^2 + 2 \left(ke^{-\beta L^2/2} - e^{-\beta L^2/4}\right) v \cos \phi \\ & + \left(ke^{-\beta L^2} - e^{-\beta L^2/4}\right) \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \left(ke^{-\beta L^2} - e^{-\beta L^2/4}\right) v^2 + 2 \left(ke^{-\beta L^2/2} - e^{-\beta L^2/4}\right) v \cos \phi \\ & + \left(k - e^{-\beta L^2/4}\right) \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

为了综合考虑分布目标的统计特性和SAR系统特性对SAR图像分辨特性的影响, 从而提出可分辨概率为评价指标^[10], 计算方法如式(14)所示

$$P_1(\rho, n) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{S_1(\phi)} f(v, \phi, \rho, n) dv d\phi \quad (14)$$

其中, $S_1(\phi)$ 为目标可分辨条件式(12)和式(13)的解。

3 分布目标可分辨概率精确计算方法

3.1 判断准则与可分辨概率计算

从分布目标统计分布的研究中可以发现, 相邻两个分辨单元信号的幅度为随机变量, 因此两个点目标信号的叠加信号 $I(r)$ 在两个目标间的最小值显然不是 $I(0)$ 。因此, 本文提出新的可分辨判断准则, 认为两个点目标如果可分辨, 则要求两个目标间亮度的最小值不大于目标亮度的 k 倍。令最小值对应的位置为 R_m , 则两个目标可分辨的条件式(10)可改写为

$$\frac{I(R_m)}{I(R_1)} \leq k, \frac{I(R_m)}{I(R_2)} \leq k, k < 1 \quad (15)$$

为了更直观地解释两种可分辨判断准则的区

别, 本文首先研究了不同幅度比对两个点目标分辨性能的影响。图1(a)~图1(c)表示两个不同幅度点目标的叠加信号, $f_1(r)$ 和 $f_2(r)$ 为两个目标信号, 目标间相位差为 $\pi/2$, 距离为2 m, 带宽为90 MHz。从图1可以发现, 两个目标间幅度差异越小, 分辨性能越好。图1(a)表示两个目标幅度相同的情况, 叠加信号的最小值在两个目标的中点位置, 且同时满足式(10)和式(15), 显然可以分辨。图1(b)中目标幅度比为1:0.7, 此时 $I(0) > I(R_2)$, 不满足式(10), 两个目标被判定为不可分辨。然而从图中可以发现, 两个目标叠加信号存在明显的拐点, 满足式(15), 是可以分辨的。图1(c)将幅度比扩大到1:0.5, 此时两个目标的信号叠加为一个信号, 显然不可分辨。

从图1可以发现, 在两个点目标幅度不等时, 最小值位置会向幅度小的目标偏移, 下面将对该位置进行分析。当 R_m 不在两个目标位置时, 需要满足式(16), 式(17)。

$$dI(R_m)/dr = 0 \quad (16)$$

$$d^2I(R_m)/dr^2 > 0 \quad (17)$$

将式(9)代入式(16)可得

$$\begin{aligned} & e^{-\beta(R_m+L/2)^2} (R_m+L/2)v^2 + e^{-\beta(R_m-L/2)^2} (R_m-L/2) \\ & + 2e^{-\beta(R_m+L/2)^2/2} e^{-\beta(R_m-L/2)^2/2} R_m v \cos \phi = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

由式(18)可知最小值的位置不仅与目标间距离有关, 还受两个目标幅度比、相位差和系统带宽的影响。将式(9)代入式(15)可得两个点目标可分辨的不等式方程组为

$$\begin{aligned} & \left(k - e^{-\beta(R_m+L/2)^2}\right) v^2 + \left(ke^{-\beta L^2} - e^{-\beta(R_m-L/2)^2}\right) \\ & + 2 \left(ke^{-\beta L^2/2} - e^{-\beta(R_m+L/2)^2/2} e^{-\beta(R_m-L/2)^2/2}\right) \\ & \cdot v \cos \phi \geq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

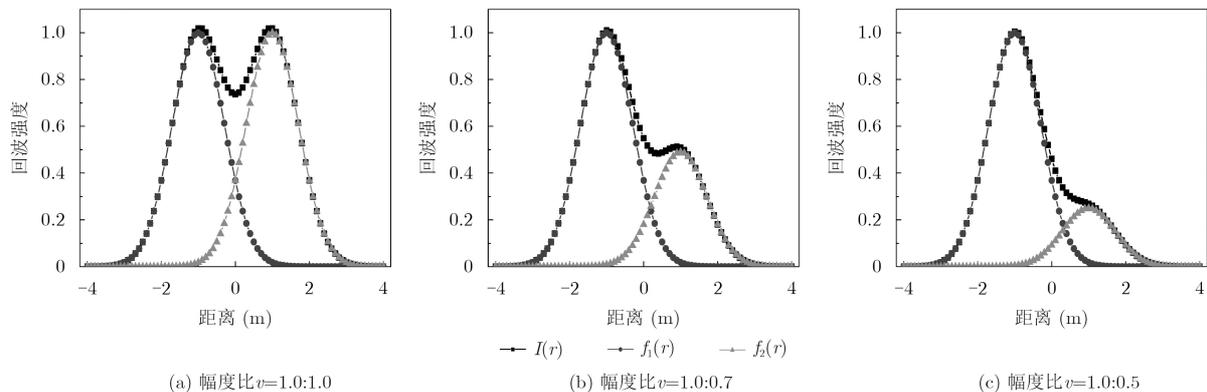


图1 两个点目标叠加信号图

$$\begin{aligned} & \left(ke^{-\beta L^2} - e^{-\beta(R_m+L/2)^2} \right) v^2 + \left(k - e^{-\beta(R_m-L/2)^2} \right) \\ & + 2 \left(ke^{-\beta L^2/2} - e^{-\beta(R_m+L/2)^2/2} e^{-\beta(R_m-L/2)^2/2} \right) \\ & \cdot v \cos \phi \geq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

两个不同幅度点目标可分辨的条件为式(17), 式(18), 式(19)和式(20), 假设由此条件得到的解为: $v \in S_2(\phi)$, 则可分辨概率的精确计算结果如式(21)所示

$$P_2(\rho, n) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{S_2(\phi)} f(v, \phi, \rho, n) dv d\phi \quad (21)$$

与式(14)求得的可分辨概率 $P_1(\rho, n)$ 相比, 在同一系统参数下, $P_2(\rho, n) \geq P_1(\rho, n)$ 。图1(b)可以解释该现象, 原有的可分辨概率计算方法并没有考虑最小值位置 R_m , 而是做了简化处理, 这会将原本可以分辨的情况误判为不可分辨, 从而降低目标的可分辨概率。

3.2 可分辨概率快速计算方法

可分辨概率精确计算方法在求解 $S_2(\phi)$ 的过程中, 需要通过式(18)不断计算 R_m 的数值解, 这会大幅增加算法的计算量, 因此本节提出一种更为快速的可分辨概率近似求法。当两个目标可分辨时, 叠加信号 $I(r)$ 在 R_m 处类似抛物线, 其斜率变化近似线性, 故可推知 $dI(r)/dr$ 在 R_m 处1阶泰勒展开中的高阶项很小。此外, 又因为 R_m 靠近两个目标的中点位置 $(R_1 + R_2)/2$, 因此, 可以将 $dI(r)/dr$ 在 $R = (R_1 + R_2)/2$ 处进行1阶泰勒展开并舍去高阶项, 从而可以计算得到 R_m 的近似解^[9], 如式(22)所示

$$\frac{dI(R_m)}{dr} \approx \frac{dI(R)}{dR} + (R_m - R) \frac{d^2I(R)}{dR^2} = 0 \quad (22)$$

将式(9)代入式(22)可以求得最小值位置的近似解为

$$\hat{R}_m = \frac{L(v^2 - 1)}{(\beta L^2 - 2)(v^2 + 1) - 4v \cos \phi} \quad (23)$$

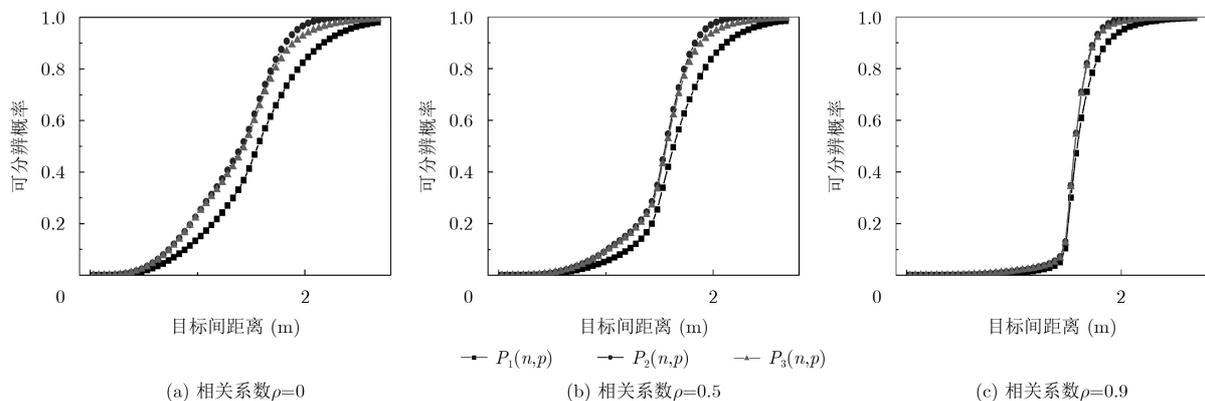


图2 单视可分辨概率计算结果

将 \hat{R}_m 代替式(17), 式(19)和式(20)中的 R_m 以求得幅度和相位差的约束关系: $v \in S_3(\phi)$, 则可分辨概率的近似计算结果如式(24)所示

$$P_3(\rho, n) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{S_3(\phi)} f(v, \phi, \rho, n) dv d\phi \quad (24)$$

4 仿真与分析

本节通过仿真计算了单视情况、多视情况下上述3种可分辨概率, 并将 $P_1(\rho, n)$ 和 $P_3(\rho, n)$ 与可分辨概率的精确计算结果 $P_2(\rho, n)$ 进行了对比分析。

图2(a)~图2(c)给出了单视不同相关系数下可分辨概率的计算结果, 系统带宽为150 MHz, 亮度比 k 取0.8。从仿真结果可以发现, 随着相关系数的增加, $P_1(\rho, n)$ 和 $P_3(\rho, n)$ 与可分辨概率精确值 $P_2(\rho, n)$ 的误差都逐渐变小。这是由于当两个目标的相关性变大时, 其幅度的变化逐渐趋向一致。而当目标的幅度相等时, 最小值的位置为两个目标的中点位置, 即 $R_m = \hat{R}_m = 0$, 此时 $P_1(\rho, n) = P_2(\rho, n) = P_3(\rho, n)$, 因此增加相关系数会减小误差。同时从图中可以看出, $P_1(\rho, n)$ 与精确值 $P_2(\rho, n)$ 间误差较大, 尤其当相关系数较小时, 误差超过30%。与此相比, 无论在何种相关系数下, $P_3(\rho, n)$ 与精确值 $P_2(\rho, n)$ 的差值更小, 误差不超过5%, 在计算精度方面明显优于 $P_1(\rho, n)$ 。

在不同相关系数下2视的可分辨概率计算结果如图3(a)~图3(c), 为了在同一坐标区间内比较多视和单视的可分辨概率计算结果, 本文假设图3中多视处理的每个子视带宽为150 MHz。比较图2和图3可以发现, 增加多视数会使得 $P_1(\rho, n)$ 和 $P_3(\rho, n)$ 更接近可分辨概率的精确值 $P_2(\rho, n)$, 这是由于多视处理会增加相邻目标间的相关性, 从而减小计算误差。从图3可以看出, 在多视情况下, 快速方法计算结果 $P_3(\rho, n)$ 与精确值 $P_2(\rho, n)$ 基本保持一致, 最大误差不超过1%。此外, 从3.2节还可以发现,

$P_3(\rho, n)$ 的计算复杂度较小。因此,在实际应用中,可分辨概率快速计算方法可用于分布目标的可分辨特性评估。

不同视数下可分辨概率的精确计算结果如图4(a), 4(b)所示,子视带宽为150 MHz,亮度比 k 取0.5。从仿真结果可以看出,当相关系数为1.0时,即相邻两个分辨单元完全相关,可分辨概率只有0和1两种状态。当目标间距离小于1.73 m时,两个目标完全不可分辨,当目标间距离大于等于1.73 m时,两个目标完全可分辨。分界点的位置只与亮度比 k 和子视带宽 B 有关,与两个确定点目标得到的SAR空间分辨率结果一致^[8]。由单个点目标确定的

传统分辨率为1 m,然而在图4中,当目标间距离为1 m时,可分辨概率不足0.3。这是由于分布目标的统计特性,使得在目标间距离小于系统分辨率时仍然存在可分辨性,在目标间距离大于系统分辨率时也存在不可分辨性。

从以上的仿真分析可知,本文提出的分布目标可分辨概率精确计算方法与原有可分辨概率计算方法相比,可分辨概率更高,这是由于提出的可分辨判断准则考虑的目标可分辨情况更宽,也更符合分布目标具有统计特性的实际情况。可分辨概率快速计算方法的误差相对较小,可用于评估分布目标的可分辨特性。

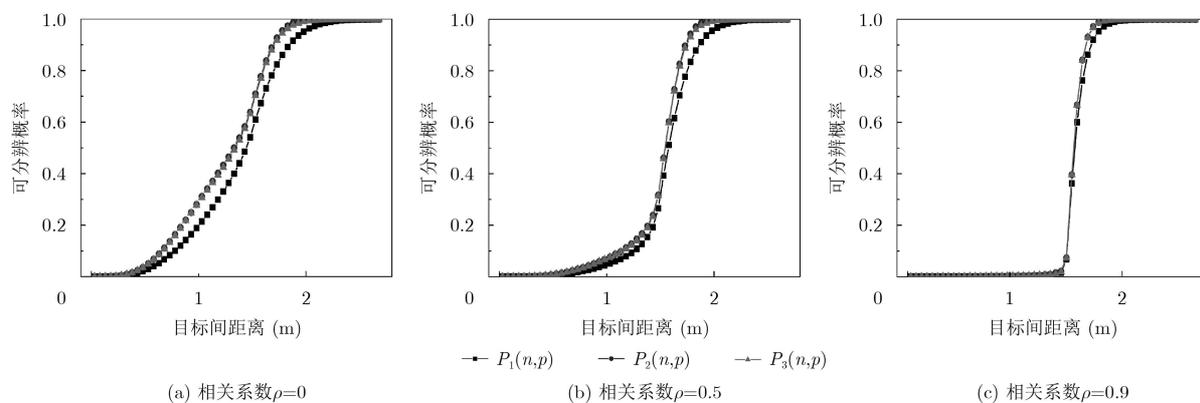


图3 2视可分辨概率计算结果

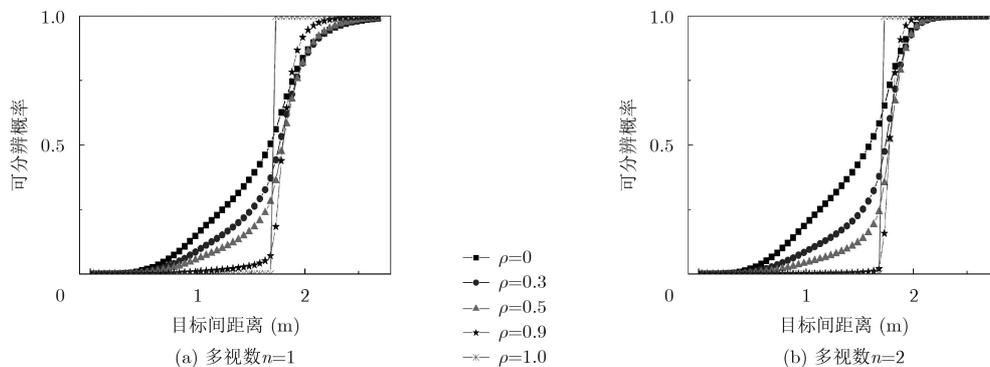


图4 可分辨概率精确计算方法仿真结果

5 结束语

本文针对原有可分辨概率计算方法精度不够的问题,细化研究了目标的可分辨条件,改进了目标的可分辨判断准则,提出了可分辨概率精确计算方法。同时为了简化计算,给出了一种可分辨概率近似计算方法。通过仿真计算,与原有可分辨概率计算方法进行了对比分析。可以看出,本文所提可分辨概率计算方法,能够更加准确地反映SAR分布目标统计特性对分辨特性的影响。快速可分辨概率计算方法的误差相对较小,可用于评估分布目标的可

分辨特性。可分辨概率精确计算方法对雷达系统设计和SAR图像质量评估都具有重要应用价值。

参考文献

- [1] YANG Jian, YAMAGUCHI Y, LEE J S, *et al.* Application of polarimetric SAR[J]. *Journal of Sensors*, 2015, 2015: 1-2. doi: 10.1155/2015/316391.
- [2] AZMEDROUB B, OUARZEDDINE M, and SOUISSI B. Extraction of urban areas from polarimetric SAR imagery[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(6):

- 2583–2591. doi: [10.1109/JSTARS.2016.2527242](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2527242).
- [3] 王哲远, 李元祥, 郁文贤. SAR图像质量评价综述[J]. 遥感信息, 2016, 31(5): 1–10. doi: [10.3969/j.issn.1000-3177.2016.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2016.05.001).
WANG Zheyuan, LI Yuanxiang, and YU Wenxian. A review of SAR image quality evaluation[J]. *Remote Sensing Information*, 2016, 31(5): 1–10. doi: [10.3969/j.issn.1000-3177.2016.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3177.2016.05.001).
- [4] FREEDMAN J. Resolution in radar systems[J]. *Proceedings of the IRE*, 1951, 39(7): 813–818. doi: [10.1109/JRPROC.1951.273680](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1951.273680).
- [5] DEN DEKKER A J and VAN DEN BOS A. Resolution: A survey[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(2): 547–557.
- [6] ZHANG Han, LI Yu, and SU Yi. SAR image quality assessment using coherent correlation function[C]. International Congress on Image and Signal Processing (CISP), Chongqing, China, 2013: 1129–1133. doi: [10.1109/CISP.2012.6469650](https://doi.org/10.1109/CISP.2012.6469650).
- [7] RIHACZEK A W. Radar resolution of ideal point scatterers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 1996, 32(2): 842–845. doi: [10.1109/7.489527](https://doi.org/10.1109/7.489527).
- [8] ZHANG Rui, WEI Xizhang, and LI Xiang. The resolution of high resolution range profile for two ideal point targets[C]. IEEE International Conference on Information Science and Technology, Wuhan, China, 2012: 397–400. doi: [10.1109/ICIST.2012.6221676](https://doi.org/10.1109/ICIST.2012.6221676).
- [9] MIR H S and CARLSON B D. On the definition of radar range resolution for targets of greatly differing RCS[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2012, 61(3): 655–663. doi: [10.1109/TIM.2011.2170371](https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2170371).
- [10] 王岩飞. 合成孔径雷达相干目标的分辨力评定[J]. 电子与信息学报, 1996, 18(3): 230–235.
WANG Yanfei. The assessment of SAR resolution of coherent targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 1996, 18(3): 230–235.
- [11] 王岩飞, 刘中梅. SAR分布目标多视图图像分辨特性研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(10): 2294–2301. doi: [10.11999/JETI170118](https://doi.org/10.11999/JETI170118).
WANG Yanfei and LIU Zhongmei. Study on distributed targets resolution of multilook SAR image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2294–2301. doi: [10.11999/JETI170118](https://doi.org/10.11999/JETI170118).
- [12] MORANDEIRA N S, GRIMSON R, and KANDUS P. Assessment of SAR speckle filters in the context of object-based image analysis[J]. *Remote Sensing Letters*, 2016, 7(2): 150–159. doi: [10.1080/2150704X.2015.1117153](https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1117153).
- [13] GOODMAN N R. Statistical analysis based on a certain multivariate complex gaussian distribution (an introduction)[J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1963, 34(1): 152–177. doi: [10.1214/aoms/1177704250](https://doi.org/10.1214/aoms/1177704250).
- 王岩飞：男，1963年生，研究员，博士生导师，主要研究方向为信号处理和合成孔径雷达。
- 陈新星：男，1993年生，硕士生，研究方向为微波成像系统理论与技术。