

文章编号: 1001-2486(2004)03-0083-06

有源诱饵的极化鉴别研究*

李永祯, 王雪松, 王涛, 肖顺平, 庄钊文

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:针对全极化测量体制雷达,研究了有源诱饵等欺骗性电子干扰的鉴别问题。首先详细分析了干扰机天线为圆极化和线极化两种典型情况下有源诱饵的极化特性,探讨了雷达目标的极化散射特性;而后提出了能够有效表征有源诱饵和雷达目标极化特性之间差异的参量——共交极化比及其峰值、聚类中心等概念和定义,并设计了有源诱饵的极化鉴别算法;最后,结合实测数据,计算机仿真实验表明鉴别算法的可行性和有效性。

关键词:有源诱饵;鉴别;极化

中图分类号:TN95 **文献标识码:**B

Polarization Discrimination Algorithm of Active Decoy and Radar Target

LI Yong-zhen, WANG Xue-song, WANG Tao, XIAO Shun-ping, ZHUANG Zhao-wen

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Hunan 410073, China)

Abstract: The discrimination problem of the active decoy and radar target is studied based on the full polarization measurement radar system in. Firstly, the polarization characteristic of the active decoy is analyzed under the condition of which antenna polarizations are circular polarization and linear polarization. Then, some polarization scattering properties of the radar target are also discussed. The co-polarization and cross-polarization ratio and its characteristics are presented, which can effectively of the polarization characteristic difference between the active decoy and radar target. A novel polarization discrimination proposal of the active decoy and radar target is given. Finally, the feasibility and validity of the discrimination proposal are verified by computer simulation and actual measured data.

Key words: active-decoy; discrimination; polarization

从 20 世纪 90 年代初的海湾战争、南联盟战争到结束不久的伊拉克战争可以看出,作战双方电子对抗愈演愈烈,特别是攻防双方的弹道导弹和雷达防御系统之间的电子对抗更是人们普遍关注的焦点。单就进攻方来说,为了在进攻的同时迷惑对方雷达,使己方导弹能够成功摧毁预定目标,采取了许多电子对抗措施,其中非常有效的一项就是设定诱饵。考虑到惰性诱饵和转发固定杂波信号的简单诱饵易被识别^[1-4],美国宾夕法尼亚大学物理与航天学教授谢尔曼·弗兰克披露了一项具有主动发射复杂干扰信号能力的主动式诱饵技术^[1,2],干扰机可以自主产生一个幅度、速度及其加速度等特征信息与真实目标相差无几的诱饵信号,使得常规时域、频域(多普勒域)上的鉴别方法难以奏效。这些新型突防技术的应用对现代雷达防御系统无疑是一个巨大的威胁。

众所周知,极化信息是继时域、频域和空域信息以外的又一极其重要的信息,其获取与处理能力是现代雷达系统探测能力的重要组成部分。目前,就极化信息的利用在雷达抗干扰、反隐身、雷达目标检测以及目标识别等方面开展了大量研究工作,在杂波、压制式干扰抑制等方面已取得了突出的研究成果^[5-7]。现有极化对抗方面的研究工作主要是针对极化度较高的单极化压制式干扰辐射源进行抑制或增强,而对于有源诱饵等欺骗性电子干扰极化鉴别问题的研究甚少见于报道。

* 收稿日期: 2004-01-22

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2002AA731145), 全国优秀博士论文专项资金资助项目(08100101), “十五”国家部委预研基金资助项目(41303517)

作者简介: 李永祯(1977—), 男, 博士生。

本文正是基于上述背景,针对全极化测量雷达体制,在详细分析了有源诱饵和雷达目标极化特性的基础上,提取能够充分反映有源诱饵和雷达目标极化特性之间差异的特征参量,探讨全极化测量雷达防御系统的有源诱饵极化鉴别问题。

1 有源诱饵的极化特性

对于现役战术、战略雷达防御系统而言,其发射/接收天线的极化形式大多为水平或垂直极化^[8],由于弹道导弹突防负荷的有限性,有源诱饵干扰系统一般采用单极化天馈系统,为了能够尽可能具有通用性,干扰机在不具备变极化能力的前提下,干扰机天线一般宜采用圆极化。考虑到在弹道导弹突防过程中目标和干扰装置的自旋运动,也可将干扰机天线设计为线极化。下面就针对圆极化和线极化两种情况,分析有源诱饵的极化特性。

1.1 圆极化天线情形

不妨假设,干扰机天线为左旋圆极化,在左、右旋正交极化基 (\hat{l}, \hat{r}) 下,雷达天线端口处的有源诱饵辐射信号可表示为

$$\mathbf{E}_{LR}(t) = \begin{bmatrix} E_L(t) \\ E_R(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} f(t), \quad t \in T \quad (1)$$

其中, $f(t)$ 为有源诱饵的信号调制形式,能够逼真地模拟雷达目标时域、频域及多普勒等信息,使得常规时、频域的鉴别方法难以区分出真假目标; T 为有源诱饵信号的持续时间。

由极化基变换公式^[7],有源诱饵在水平、垂直极化基 (\hat{h}, \hat{v}) 下表示为

$$\mathbf{E}_{HV}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix} \mathbf{E}_{LR}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix} f(t), \quad t \in T \quad (2)$$

由于干扰机天线的圆极化特性不随干扰装置姿态的变化而改变,对于诸如采用极化编码测量技术等全极化测量雷达体制而言^[9],即认为雷达在一个脉冲重复周期内可以获取目标的极化散射矩阵信息,有源诱饵在水平、垂直极化基 (\hat{h}, \hat{v}) 下的极化散射矩阵可描述为

$$\mathbf{S}_{HV}(t) = \begin{bmatrix} S_{HH}(t) & S_{HV}(t) \\ S_{VH}(t) & S_{VV}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & j \end{bmatrix} f(t), \quad t \in T \quad (3)$$

同理,若干扰机天线为右旋圆极化,有源诱饵的极化散射矩阵为

$$\mathbf{S}_{HV}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & -j \end{bmatrix} f(t), \quad t \in T \quad (4)$$

1.2 线极化天线情形

若在正交极化基 (\hat{a}, \hat{b}) 下干扰机天线为线极化。由于干扰机姿态的变化,将造成雷达和干扰机的极化失配。在 t 时刻,设干扰机天线的极化相对于雷达天线的水平极化存在一个偏角 θ ,则雷达天线端口处有源诱饵辐射的信号可描述为

$$\mathbf{E}_{AB}(t) = \begin{bmatrix} E_A(t) \\ E_B(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} f(t), \quad t \in T \quad (5)$$

由极化基变换公式^[7],有源诱饵在正交极化基 (\hat{h}, \hat{v}) 下表示为

$$\mathbf{E}_{HV}(t) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \mathbf{E}_{AB}(t) = \begin{bmatrix} \cos\theta(t) \\ \sin\theta(t) \end{bmatrix} f(t), \quad t \in T \quad (6)$$

其中, $\theta = \theta(t)$,且有 $\theta \in [0, \pi]$ 。

对于全极化测量雷达体制而言,有源诱饵在水平、垂直极化基 (\hat{h}, \hat{v}) 下的极化散射矩阵可描述为:

$$\mathbf{S}_{HV}(t) = \begin{bmatrix} \cos\theta(t) & \cos\theta(t) \\ \sin\theta(t) & \sin\theta(t) \end{bmatrix} f(t), \quad t \in T \quad (7)$$

1.3 有源诱饵的极化特性

对于干扰机天线为圆极化和线极化两种情况下,有源诱饵的极化散射矩阵在水平、垂直极化基(\hat{h}, \hat{v})下可简记为如下形式

$$S_{HV} = \begin{bmatrix} P(t) & P(t) \\ Q(t) & Q(t) \end{bmatrix}, \quad t \in T \quad (8)$$

则有源诱饵的 Graves 功率矩阵为^[7]

$$G_{HV} = \begin{bmatrix} G_{HH} & G_{HV} \\ G_{VH} & G_{VV} \end{bmatrix} = S_{HV}^H S_{HV} = \begin{bmatrix} |P(t)|^2 + |Q(t)|^2 & |P(t)|^2 + |Q(t)|^2 \\ |P(t)|^2 + |Q(t)|^2 & |P(t)|^2 + |Q(t)|^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可见,有源诱饵的极化散射矩阵必具有如下特性:

- (1) $S_{HH} + S_{VV} = S_{HV} + S_{VH}$, 即共极化分量之和等于交叉极化分量之和;
- (2) $|S_{HV}| = S_{HH}S_{VV} - S_{HV}S_{VH} = 0$, 即共极化分量之积等于交叉极化分量之积;
- (3) $|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 = |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2$, 即共极化分量功率之和等于交叉极化分量功率之和;
- (4) $|G_{HV}| = G_{HH}G_{VV} - G_{HV}G_{VH} = 0$, 即有源诱饵 Graves 功率矩阵的行列式为零;
- (5) $G_{HH} = G_{VV} = G_{HV} = G_{VH}$, 即有源诱饵 Graves 功率矩阵的 4 个分量相等;
- (6) $G_{HH} + G_{VV} = G_{HV} + G_{VH}$, 即有源诱饵 Graves 功率矩阵的对角分量之和等于其反对角分量之和。

2 典型雷达目标的极化散射特性

在弹道导弹突防等应用背景中,目标的形体一般较为简单,诸如锥体、圆柱体、椭球体等,可视作金属球/平板、二面角和螺旋线等的简单组合。下面先给出典型简单形体目标的极化散射矩阵,而后结合实测数据分析诸如隐身目标等复杂雷达目标的极化散射特性。针对全极化测量雷达体制,首先给出金属球/平板、细导线、二面角以及螺旋线等典型简单形体目标的极化散射矩阵^[10],具体如表 1 所示。

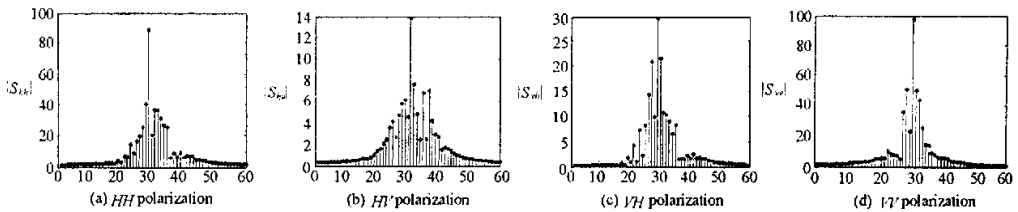
表 1 水平、垂直极化基下典型简单形体目标的极化散射矩阵

Tab. 1 PSM of typical radar target in polarization basis of H/V

简单形体目标	极化散射矩阵	简单形体目标	极化散射矩阵
球或平板	$S_{\text{球/板}} = a \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	二面角	$S_{\text{二面角}} = a \begin{bmatrix} \cos 2\Psi & \sin 2\Psi \\ \sin 2\Psi & -\cos 2\Psi \end{bmatrix}$
细导线	$S_{\text{细导线}} = a \begin{bmatrix} \cos^2 \Psi & -\sin 2\Psi \\ -\sin 2\Psi & \sin^2 \Psi \end{bmatrix}$	左螺旋线	$S_{\text{左螺旋线}} = \frac{1}{2} a e^{-j2\varphi} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix}$

其中, a 为目标散射的幅度信息, Ψ 为入射方向角。

由表 1 可以看出,一般情况下,雷达目标极化散射矩阵的共极化分量之和与交叉极化分量之和相差较大,共极化分量功率之和也不再等于交叉极化分量功率之和。对于复杂雷达目标而言,由雷达目标的极化分解理论^[11]可知,复杂雷达目标的散射可以看作是金属球/平板、二面角和螺旋线等几种简单形体目标散射的线性组合。一般情况下,当使用线极化进行发射和接收时,目标的共极化回波比交叉极化回波要强得多^[10,13],二者功率比在 4~14dB 之间,平均约为 10dB。这里给出某隐身目标缩比模型作为目标在俯仰角为 0 度、方位角为 0 度的姿态下的实测结果,如图 1 所示,其中横坐标代表时间,纵坐标表示隐身目标 HH、HV、VH 和 VV 散射分量的幅度,测量系统采用步进频率体制,中心频率为 35GHz,带宽为 1GHz,信号径向分辨力为 15cm,目标长约 2.3m。因而利用目标和有源诱饵的极化特性,有望为有源诱饵欺骗性干扰信号的鉴别提供新的解决途径。

图1 某隐身目标的 HH 、 HV 、 VH 和 VV 分量随时间变化的曲线图Fig.1 Fluctuant curve of HH , HV , VH , VV polarization's amplitude in company with time of radar target

3 有源诱饵的极化鉴别算法

3.1 鉴别特征量的提取

由第2节可知,极化散射矩阵的共极化分量之和与交叉极化分量之和的比值(简称为共交极化比)能够很好地刻画有源诱饵与雷达目标极化特性之间的差异,记为

$$C_R(t) = \left| \frac{S_{HH}(t) + S_{VV}(t)}{S_{HV}(t) + S_{VH}(t)} \right|, \quad t \in T \quad (10)$$

显而易见,对于有源诱饵而言,在干扰信号存在的时间域上,共交极化比的值是固定的,有 $C_R(t) = 1$;对于雷达目标而言,它可能在任一时刻的取值均不相同,一般有 $C_R(t) \neq 1$ 。因此,通过描述共交极化比即可刻画有源诱饵和目标极化特性变化规律的不同,下面给出共交极化比的峰值为:

$$C_{R \max} = \max_{t \in T} C_R(t) \quad (11)$$

上面基于极化散射矩阵给出了共交极化比的一般定义,表2给出了有源诱饵和典型简单形体目标的部分计算结果。

表2 典型简单形体的共交极化比及其特征参量

Tab.2 Co-polarization and cross-polarization ratio and its characteristics of simple radar target

目标	有源诱饵	球或平板	细导线	二面角	左螺旋线
共交极化比	1	∞	$\sin^{-1} 2\Psi$	0	0
共交极化比的峰值	1	∞	∞	0	0

3.2 极化鉴别算法

下面给出就以共交极化比的峰值为鉴别参量的有源诱饵极化鉴别流程,如图2所示。在忽略测量噪声影响的情况下,前面分别分析了有源诱饵和雷达目标的极化特性,并基于极化散射特性的差异给出了有源诱饵的极化鉴别算法流程,下面分析噪声存在情况下鉴别算法的性能。对于单基地雷达而言,有源诱饵极化散射矩阵的测量数据为:

$$S = S_j + S_N = \begin{bmatrix} A(t) & A(t) \\ B(t) & B(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{HH}(t) & n_{HV}(t) \\ n_{VH}(t) & n_{VV}(t) \end{bmatrix}, \quad t \in T \quad (12)$$

其中, $S_N = \begin{bmatrix} n_{HH}(t) & n_{HV}(t) \\ n_{VH}(t) & n_{VV}(t) \end{bmatrix}$ 为测量噪声的等效极化散射矩阵。

测量噪声等效极化散射矩阵的列矢量可记为 $X_N = [n_{HH}(t), n_{HV}(t), n_{VH}(t), n_{VV}(t)]^T$, 对于任一时刻 t 而言, $n_{HH}(t), n_{HV}(t), n_{VH}(t), n_{VV}(t)$ 均为随机变量,不妨设 X_N 服从零均值正态分布,其协方差矩阵为

$$\Sigma_N = \sigma_H \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \rho\sqrt{\gamma} \\ 0 & \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon & 0 \\ \rho^*\sqrt{\gamma} & 0 & 0 & \gamma \end{bmatrix}$$

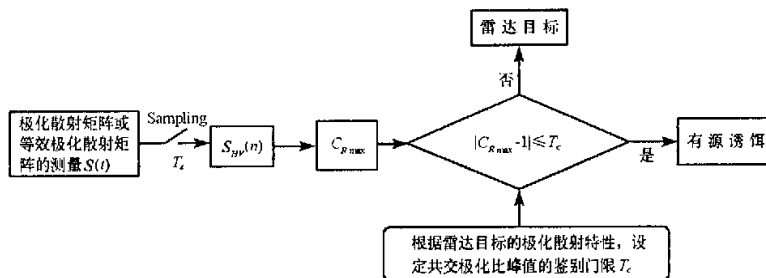


图2 有源诱饵的极化鉴别流程

Fig.2 Polarization discrimination flow chart of active-decoy and radar target

其中, $\sigma_H = E[|n_{HH}(t)|^2]$, $\epsilon = \frac{E[|n_{HV}(t)|^2]}{\sigma_H} = \frac{E[|n_{VH}(t)|^2]}{\sigma_H}$, $\gamma = \frac{E[|n_{VW}(t)|^2]}{\sigma_H}$, $\rho = \frac{E[n_{HH}(t) \cdot n_{VW}^*(t)]}{\sigma_H \sqrt{\gamma}}$ 。

为了分析问题方便起见,原则上可将雷达目标和干扰信号视为确定性信号,而测量噪声视为服从零均值正态随机变量,通过概率密度函数变换可以得到目标和干扰的共交极化比的统计分布特性,进而可以求出目标和干扰的共交极化比峰值的统计分布,而后根据设定的判决门限,可得有源诱饵的正确鉴别概率。由于上述求解过程相当复杂、繁琐,难以得到解析表达式。下面通过计算机仿真来分析、评估本文提出的有源诱饵极化鉴别算法的性能。首先给出干扰噪声比(JNR)和目标信号噪声比(SNR)的定义为:

$$JNR = \frac{E[\text{span}S_0]}{E[\text{span}S_c]} = \frac{2[A^2(t) + B^2(t)]}{\sigma_H(1 + 2\epsilon + \gamma)}, \quad SNR = \frac{|S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{VW}|^2}{\sigma_H(1 + 2\epsilon + \gamma)} \quad (13)$$

正如前文所述,由于有源诱饵具有复杂的信号调制形式,在能量上、波形上、速度、加速度等特征参量几乎与雷达目标相同,故在下面的计算机仿真中,不妨设 $SNR \approx JNR$ 。图3给出了几种典型简单形体目标(诸如球/平板、细导线、二面角和左螺旋线等)和有源诱饵的共交极化比随着 SNR 的变化曲线。

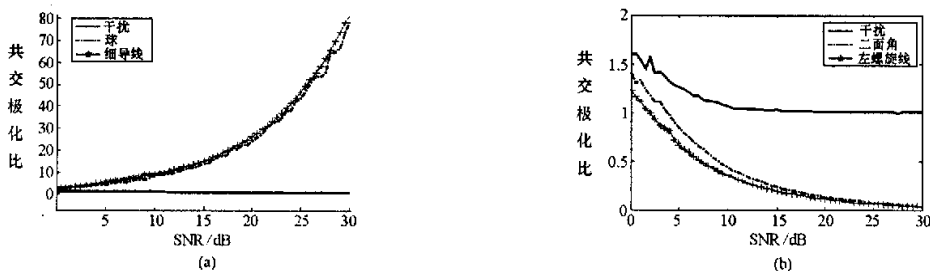


图3 典型简单形体目标和诱饵的共交极化比随 SNR 变化的变化规律

Fig.3 Fluctuation curves of co-and cross-polarization ratio of active-decoy and radar target in company with SNR (入射角均为 $\Psi = 60^\circ$, 杂波参数为: $\epsilon = 0.3, \gamma = 0.7, \rho = 0$)

由图3可见,只要根据雷达目标的部分先验知识,选择合适的判决门限,就能够有效地鉴别有源诱饵干扰信号。表3给出了在不同信噪比条件下($T_h = 0.5$, 测量噪声参数为 $\epsilon = 0.3, \gamma = 0.7, \rho = 0$),简单形体目标正确判决的概率以及有源诱饵误判为雷达目标的概率。表4给出了某隐身目标在不同信噪比条件下正确判决的概率以及有源诱饵误判为雷达目标的概率,其中 $T_h = 1$,其它参数取值同上。

表3 典型简单形体目标正确判决的概率以及诱饵误判为雷达目标的概率

Tab.3 Misjudgment probability of active-decoy and right judgment probability of simple radar target

SNR (dB)	0	5	10	15	20	25	30
干扰	84.53%	68.6%	35.94%	5.6%	0.08%	0	0
球	95.95%	98.55%	99.96%	100%	100%	100%	100%
细导线	90.01%	99.39%	100%	100%	100%	100%	100%
二面角	92.56%	93.07%	96.16%	99.53%	100%	100%	100%
左螺旋线	92.75%	93.66%	97.24%	99.94%	100%	100%	100%

表4 隐身目标正确判决的概率以及诱饵误判为雷达目标的概率

Tab.4 Misjudgment probability of active-decoy and right judgment probability of concealed radar target

SNR (dB)	10	12	14	16	18	20	25
干扰	72.54%	15.4%	0.6%	0	0	0	0
隐身目标	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

由表3和表4及大量的计算机仿真实验结果可见,当雷达目标信噪比(SNR)达到13~15dB的水平时,利用本文算法,即可以相当高的概率对目标和有源诱饵进行鉴别。对简单形体目标而言,有源诱饵的误判率达到6%以下,而对复杂目标而言,有源诱饵的误判率可达1%以下。在实际应用中,真假目标的鉴别工作往往要放在雷达的跟踪阶段进行,此时信噪比可达更高水平,一般在20dB左右,此时有源诱饵的误判率不超过0.1%。

在此基础上,可以进一步利用有源诱饵极化散射矩阵和其Graves功率矩阵的其它特性,则可以在一定程度上改善有源诱饵鉴别的性能,这里不再赘述。

4 结束语

弹道导弹已多次成功应用于实战,是未来局部战争和地区冲突的主要威胁。本文瞄准未来局部战争中弹道导弹突防负荷的“主动式”诱饵等干扰新技术、新装备,针对全极化测量雷达体制,在详细分析了有源诱饵和雷达目标极化特性的基础上,提出了一种新颖的、具有探索意义的极化鉴别方案,并通过计算机仿真验证了该鉴别算法的有效性。但是,在本文的分析中,鉴别算法的判决门限选取和鉴别性能的评估等没有给出解析的表达式,这是我们下一步重点探索的工作。同时,考虑到弹道导弹突防过程中可能使用组合干扰措施,即设计在压制式干扰中雷达目标和有源诱饵的极化抑制和极化鉴别问题,也是我们下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] Lewis G N, Postol T A. Future Challenges to Ballistic Missile Defense[J]. IEEE Spectrum, 1997.
- [2] [Http://www.hub.cetin.net.cn/info/commentnew.asp?infoid=2971](http://www.hub.cetin.net.cn/info/commentnew.asp?infoid=2971)[EB].
- [3] 王菁华,李漫红,译. 用有源假目标挫败战区导弹防御雷达[J]. 863先进防御技术, 1997, 10-11.
- [4] 马骏声. 美国的弹道导弹防御和它所遇到的挑战[J]. 航天电子对抗, 1998, (3).
- [5] Boerner W M. Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry[C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [6] Giuli D. Polarization Diversity in Radars[J]. Proc. of the IEEE, 1986, 74(2): 245-269.
- [7] 庄韵文,肖顺平,王雪松. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [8] 世界地面雷达手册(第二版)[M]. 电子信息产业部第14研究所, 2002.
- [9] Giuli D, Fossi M, Facheris L. Radar Target Scattering Matrix Measurement through Orthogonal Signals[J]. IEE Proceedings-F, 1993, 140(4).
- [10] Kitayama K, Yamaguchi Y, Yang J, Yamada H. Compound Scattering Matrix of Targets Aligned in the Range Direction[J]. IEICE Trans. COMMUN., 2001, E84(1).
- [11] Claude S R, Pottier E. A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry[J]. IEEE GRS, 1996, 34(2): 498-517.

