

基于二天线的双基地 DPCA 技术

陈娟 王盛利

(南京电子技术研究所 南京 210013)

摘要: 该文给出了双基地相位中心偏置天线(DPCA)技术的空间几何模型,从接收信号模型入手分析了双基地 DPCA 技术的杂波抑制原理,并给出了计算机的仿真结果。文章指出,双基地 DPCA 技术要求天线间隔 D , 脉冲重复频率 PRF 以及载机速度 V_a 三者严格满足条件: $D = m \cdot V_a / PRF$ (m 是一正整数),这跟单基地情况下是一致的;当约束条件不能满足时,杂波的抑制效果将受到一定的影响。

关键词: 双基地雷达;相位中心偏置天线(DPCA);杂波抑制;动目标检测

中图分类号: TN957.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1687-04

Bistatic Radar DPCA Technique Based on Two-antenna

Chen Juan Wang Sheng-li

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: This paper gives the geometry of bistatic radar DPCA(Displaced Phase Center Antenna) technique based on two-antenna. The computer simulation results are also given. The bistatic radar DPCA technique requires that the spacing between the phase centers of the two antennas D is made equal to $m \cdot V_a / PRF$, where m is a positive integer, PRF is the pulse repetition frequency and V_a is the velocity of the moving platform, just as the monostatic case. When the condition $D = m \cdot V_a / PRF$ is not satisfied, clutter can't be cancelled completely.

Key words: Bistatic radar; Displaced Phase Center Antenna (DPCA); Clutter suppression; Moving targets detection

1 引言

由于电磁波是直线传播的,受地球曲率的限制以及山地、高大建筑物的影响,使地面雷达探测产生盲区。另外,对于一些超低空飞行目标(如直升机、巡航导弹)可以在离地面大约 50m 的距离沿绕地面建筑物飞行,在这种地面强杂波背景下,很难检测到这些动目标。低空飞行目标给雷达探测带来的困难与威胁是很严峻的。DPCA 方法最初是为补偿雷达平台的运动效应而提出来的,实际是补偿因雷达平台运动造成的杂波谱展宽,是一种杂波抑制技术。经典的 DPCA 方法采用两个移位相位中心,首先由前置天线发射和接收第一个脉冲。当后置天线到达前置天线发射脉冲的位置时,发射下一个脉冲。前后两个脉冲是在空中的同一点发射和接收的,这就相当于两个脉冲是由一个静止的天线发射和接收的,这样就可以补偿由雷达平台运动造成的杂波谱展宽^[1]。

由于电子攻击技术的发展,单基地雷达面临着“四大威胁”^[2]: 电子干扰、超低空突防、隐形武器以及反辐射导弹,因此单基地雷达的生存能力面临着严峻的考验。相对常规单基地雷达而言,双基地雷达系统具有独特的优越性:由于接收系统本身不发射电磁波,可利用其它辐射源的信号进行目

标探测,因而系统不容易被敌方侦察系统所发现,可增强抗有源干扰和抗反辐射导弹的能力;同时利用空中发射,地面接收的工作方式,可有效地检测(超)低空飞行目标(如直升机、巡航导弹),增大地面雷达对低空目标的作用距离。

2 双基地 DPCA 分析模型与约束条件

在双基地平面(目标、发射基地、接收基地 3 点确定的平面)^[2] $x-y$ 平面内,设地面接收系统所处的位置为坐标原点 o , (X, Y) 处存在一目标,方位向速度为 V_x , 距离向速度为 V_y (对于杂波, $V_x = V_y = 0$)。载机以速度 V_a 平行于 $+x$ 轴方向飞行。沿载机的飞行方向放置天线 1 和天线 2, 两天线的相位中心间距为 D 。初始时刻($t = 0$), 天线 2 位于 (x_0, y_0) 位置, 两天线以脉冲重复周期 T 为间隔交替发射线性调频信号, 形成两路信号, 地面系统分别给予接收。基于二天线的双基地 DPCA 技术的空间几何模型见图 1。

参照图 1, 假设 (X, Y) 处存在的目标静止, 要达到消除杂波的目的, 必须使 t_0 时刻天线 2 的照射场景和 $t_0 + mT$ 时刻天线 1 的照射场景完全相同, 即 $r_1(t_0 + mT) + r_3(t_0 + mT) = r_2(t_0) + r_3(t_0)$ (其中 $r_1(t_0 + mT)$ 表示 $t_0 + mT$ 时刻天线 1 与目标的距离, $r_3(t_0)$ 和 $r_3(t_0 + mT)$ 分别表示 t_0 和 $t_0 + mT$ 时刻目标与地面接收系统的距离, $r_2(t_0)$ 表示 t_0 时刻天线 2 与目标的距离)。由于目标静止, 所以 $r_3(t_0 +$

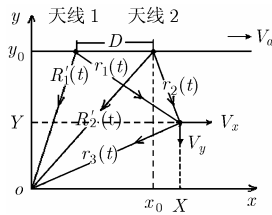


图1 双基地 DPCA 空间几何模型

$mT) = r_3(t_0)$, 进而要求 $r_1(t_0 + mT) = r_2(t_0)$ 。因为 $r_1(t_0 + mT) = \sqrt{[X + D - x_0 - V_a(t_0 + mT)]^2 + (Y - y_0)^2}$, $r_2(t_0) = \sqrt{(X - x_0 - V_a t_0)^2 + (Y - y_0)^2}$, 所以得到 $D = m \cdot V_a \cdot T$, 此即双基地 DPCA 技术的约束条件。

3 杂波抑制原理

利用图1所示的空间几何模型, 设 (X, Y) 处存在一目标, 方位向速度为 V_x , 距离向速度为 V_y 。在 t 时刻, 天线2运动至 $(V_a t + x_0, y_0)$ 位置, 天线1运动至 $(V_a t + x_0 - D, y_0)$ 位置。天线1发射的信号经两个路径 $(R_1'(t)$ 和 $R_1(t) = r_1(t) + r_3(t)$) 分别被地面系统接收, 其中 $R_1'(t)$, $r_1(t)$ 以及 $r_3(t)$ 分别为

$$R_1'(t) = \sqrt{(x_0 - D + V_a t)^2 + y_0^2} \quad (1)$$

$$r_1(t) = \sqrt{(x_0 + V_a t - D - X - V_x t)^2 + (y_0 - Y + V_y t)^2} \quad (2)$$

$$r_3(t) = \sqrt{(X + V_x t)^2 + (Y - V_y t)^2} \quad (3)$$

天线2发射的信号同样经两个路径 $(R_2'(t)$ 和 $R_2(t) = r_2(t) + r_3(t)$) 分别被地面系统接收, 其中 $R_2'(t)$, $r_2(t)$ 分别为

$$R_2'(t) = \sqrt{(x_0 + V_a t)^2 + y_0^2} \quad (4)$$

$$r_2(t) = \sqrt{(x_0 + V_a t - X - V_x t)^2 + (y_0 - Y + V_y t)^2} \quad (5)$$

地面系统接收到的信号经过检波和距离向压缩, 忽略收发天线增益的变化和距离向处理的影响^[3](用 G 表示), 并将地面系统接收到的直达信号 $(s_1'(t) = G \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_1'(t))}$ 和 $s_2'(t) = G \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_2'(t))}$) 作为系统的相参信号, 与经目标反射的信号 $(s_1''(t) = G \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_1(t))}$ 和 $s_2''(t) = G \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_2(t))}$) 共轭相乘作为地面接收系统的处理信号: 对于天线1发射的信号, 地面系统的处理信号为 $s_1(t) = G^2 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_1(t) - R_1'(t))}$; 对于天线2发射的信号, 地面系统的处理信号为 $s_2(t) = G^2 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_2(t) - R_2'(t))}$ 。

对两路处理信号采用 DPCA 方法处理, 在时域完成对消, 即 $s_1(t + mT) - s_2(t)$

$$\begin{aligned} &= G^2 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_1(t+mT) - R_1'(t+mT))} - G^2 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_2(t) - R_2'(t))} \\ &= G^2 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r_1(t+mT) + r_3(t+mT) - R_1'(t+mT))} - G^2 \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r_2(t) + r_3(t) - R_2'(t))} \end{aligned} \quad (6)$$

将 $D = m \cdot V_a \cdot T$ 以及式(1)~式(5)代入式(6), 得

$$\begin{aligned} s_1(t + mT) - s_2(t) &= G^2 \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\right. \\ &\cdot \left[\sqrt{(x_0 - X + (V_a - V_x)t - mV_x T)^2 + (y_0 - Y + V_y(t + mT))^2}\right. \\ &\left. + \sqrt{(X + V_x(t + mT))^2 + (Y - V_y(t + mT))^2} - \sqrt{(x_0 + V_a t)^2 + y_0^2}\right\] \\ &- G^2 \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\left[\sqrt{(x_0 - X + (V_a - V_x)t)^2 + (y_0 - Y + V_y t)^2}\right.\right. \\ &\left. + \sqrt{(X + V_x t)^2 + (Y - V_y t)^2} - \sqrt{(x_0 + V_a t)^2 + y_0^2}\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知, 对于静止目标, $V_x = V_y = 0$, 于是有 $s_1(t + mT) - s_2(t) = 0$, 这表明静止目标被对消掉。而对于径向速度或方位向速度不为零的动目标, $s_1(t + mT) - s_2(t) \neq 0$, 动目标信息得以保留。

4 杂波残留

理想双基地 DPCA 技术能很好地抑制杂波, 这跟单基地情况是一致的。双基地 DPCA 技术也要求天线相位中心间距 D 、载机速度 V_a 、脉冲重复周期 T 之间严格满足 $D = m \cdot V_a \cdot T$ 这个约束条件。事实上, 存在 4 类影响杂波残留量的误差^[4]: (1)子天线方向性图不匹配; (2)通道不一致; (3)载机运动误差; (4)杂波起伏。

杂波的起伏必然导致两天线在相邻时刻、同一位置观察到的场景不完全一样, 影响杂波的对消。起伏型杂波类似极低速的动目标, DPCA 会将其当成动目标信息而被保留下来^[5], 本文不在赘述。子天线方向性图不匹配和通道不一致可以统一为通道失配问题^[5], 是本文要考虑的问题。载机运动误差是约束条件 $D = m \cdot V_a \cdot T$ 不满足的原因之一, 系统稳定度不高引起的脉冲重复周期 T 的起伏也会导致 $D \neq m \cdot V_a \cdot T$ 。

4.1 $D \neq m \cdot V_a \cdot T$ 对杂波残留量的影响

实际中载机往往不能长时间保持匀速直线运动状态, 载机速度 V_a 总存在很大的起伏。另外, 实际系统设计中脉冲重复频率 PRF 稳定度不高。以上两个因素导致了 $D = m \cdot V_a \cdot T$ 这个约束条件很难满足, 就无法将 $s_1(t)$ 恰好时移 m 个脉冲周期与 $s_2(t)$ 对消, 影响了杂波抑制效果。现将载机速度起伏和系统的不稳定两个因素对杂波对消效果的影响讨论如下: 设载机的速度 V_a 存在起伏 dV_a , 系统不稳定导致脉冲重复周期存在起伏 dT , 孔径间隔 D 固定。此时, 经过 DPCA 处理后杂波残留可以表示为

$$\begin{aligned} s_{a1}(t + m(T + dT)) - s_{a2}(t) &= G^2 \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\right. \\ &\cdot \left[\sqrt{\{x_0 + (V_a + dV_a)[t + m(T + dT)] - D - X\}^2 + (y_0 - Y)^2}\right. \\ &\left. + \sqrt{X^2 + Y^2} - \sqrt{\{x_0 - D + (V_a + dV_a)[t + m(T + dT)]\}^2 + y_0^2}\right\] \\ &- G^2 \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda}\left[\sqrt{\{x_0 + (V_a + dV_a)t - X\}^2 + (y_0 - Y)^2}\right.\right. \\ &\left. + \sqrt{X^2 + Y^2} - \sqrt{\{x_0 + (V_a + dV_a)t\}^2 + y_0^2}\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

把 $D = m \cdot V_a \cdot T$ 代入式(8)得到:

$$s_{d1}(t + m(T + dT)) - s_{d2}(t) = G^2 \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} \left[\sqrt{x_0 + \alpha t + dV_a \cdot m \cdot T + \alpha \cdot m \cdot dT - X}^2 + (y_0 - Y)^2 \right] + \sqrt{X^2 + Y^2} - \sqrt{[x_0 + \alpha t + m\alpha \cdot dT + m \cdot T \cdot dV_a]^2 + y_0^2} \right\} - G^2 \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} \left[\sqrt{x_0 + \alpha t - X}^2 + (y_0 - Y)^2 \right] + \sqrt{X^2 + Y^2} - \sqrt{[x_0 + \alpha t]^2 + y_0^2} \right\} \quad (9)$$

式中 $\alpha = (V_a + dV_a)$ 。

由式(9)可知:

当 $dV_a = 0$ 且 $dT = 0$ 时, $|s_{d1}(t + m(T + dT)) - s_{d2}(t)| = 0$, 杂波被抑制;

当 $dV_a \neq 0$ 或 $dT \neq 0$ 时, $|s_{d1}(t + m(T + dT)) - s_{d2}(t)| > 0$, 杂波有残留。

4.2 通道失配对杂波残留的影响

上述分析是在接收通道完全匹配的情况下进行的。实际中, 通道间总存在着一定的失配。设通道 1 与通道 2 间存在恒定的相位误差 ($d\phi$) 和幅度误差 (dA)。此时, 通道 1 和通道 2 的信号分别表示为

$$s_{mis1}(t) = s_1(t) \\ s_{mis2}(t) = s_2(t) \cdot dA \cdot e^{j \cdot d\phi}$$

则经过 DPCA 处理后杂波对消特性如式(10)所示:

$$|s_{mis}(t)| = |s_{mis1}(t + mT) - s_{mis2}(t)| = |G^2| |1 - dA \cdot e^{j \cdot d\phi}| \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 通道匹配时 ($dA = 1$ 且 $d\phi = 0$), 杂波被彻底抑制; 通道失配时, 杂波有残留。实际雷达系统中, 幅度失配量大概是 1dB, 相位失配量一般能达到 10° (即 $dA = 1.122, d\phi = 0.174\text{rad}$)。将 $dA = 1.122, d\phi = 0.174\text{rad}$ 代入式(10), $|s_{mis}(t)| \approx 0.22|G^2|$ 。这样大的杂波残留量, 会与剩余动目标信号相竞争, 不利于动目标检测, 文中给出了仿真结果。

5 计算机仿真实证

仿真系统采用以下参数: 波长 $\lambda = 0.03\text{m}$, 相邻的天线间隔 $D = 1\text{m}$, 载机航迹与地面系统之间的斜距 $y_0 = 8\text{km}$, 载机速度 $V_a = 200\text{m/s}$, 以脉冲重复频率 $\text{prf} = 2000\text{Hz}$ 发射线性调频信号, 脉宽 $20\mu\text{s}$, 方位波束宽度 3° 为, 下面给出仿真结果。

图 2 示意了运动目标距离向速度 V_y 和方位向速度 V_x 对残留幅度的影响。x 轴表示目标方位向速度(单位 m/s), y 轴表示目标距离向速度(单位 m/s), z 轴表示归一化残留幅度 (即 $20 \cdot \lg \frac{\text{对消后残留幅度}}{\text{对消前信号幅度}}$, 单位 dB)。从图中可以看出, 当速度 $V_x = 0$ 且 $V_y = 0$ 时, 残留幅度极其小, 杂波被抑制; 当速度 $V_y \neq 0$ 或 $V_x \neq 0$ 时, 残留幅度较大, 即动目标信息得以不同程度的保留。

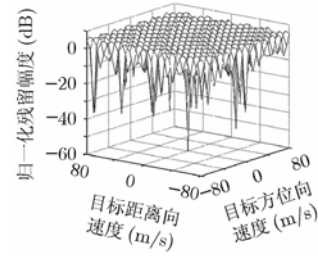


图 2 双基地 DPCA 对消残留

图 3 示意的是载机速度起伏对 DPCA 对消残留的影响。为便于考虑, 设目标方位向速度 $V_x = 0\text{m/s}$, 仅对目标距离向速度加以考虑。从图 3 可以发现, 理想情况下天线间隔 $D = 1\text{m}$, 载机速度 $V_a = 200\text{m/s}$, 脉冲重复频率 $f = 2000\text{Hz}$, 约束条件 $D = m \cdot V_a \cdot T$ (此时 $m = 10$) 得以满足, 所以杂波抑制得比较彻底; 当载机加速 ($V_a = 210\text{m/s}$) 和减速 ($V_a = 190\text{m/s}$) 时, $D \neq m \cdot V_a \cdot T$, 对消效果受到很大的影响。

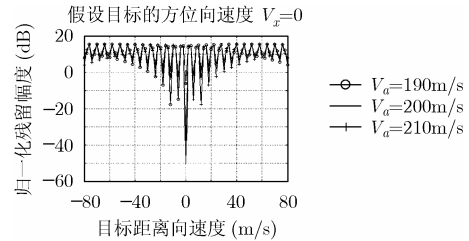


图 3 载机速度起伏的影响

下面从距离-多普勒域动目标检测方面来说明 DPCA 的杂波抑制性能, 动目标参数见表 1。

表 1 动目标参数

目标序号	方位向速度 V_x	距离向速度 V_y	方位向位置 X	目标斜距 Y
1	50(m/s)	60(m/s)	7600m	120m
2	-100(m/s)	0(m/s)	8200m	120m

图 4 示意的是单目标情况下, DPCA 对消前、后目标所在距离门的图像。仿真过程中设定, 两通道完全匹配, 约束关系式 $D = m \cdot V_a \cdot T$ ($m = 10$) 严格满足, 接收机输出端信杂比 (SCR) 为 -23.5218dB , 信噪比 (SNR) 为 -1.8183dB 。所以, 对消前目标完全淹没在杂波和噪声中, 无法检测到; 对消后, 杂波已降到噪声水平, 信杂比 SCR 至少改善 $12 + 23.5218 = 35.5218\text{dB}$, 动目标可以被检测到。

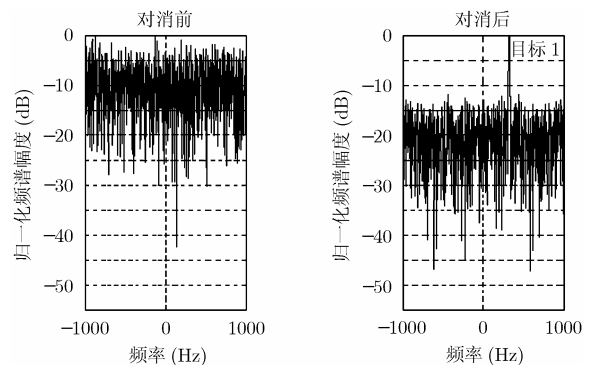


图 4 单目标检测

图 5 示意的是多(两)目标情况下, DPCA 对消前、后目标所在距离门的图像。仿真过程中, 杂波和噪声的设置以及其他仿真条件与图 4 中的设置是一样的。

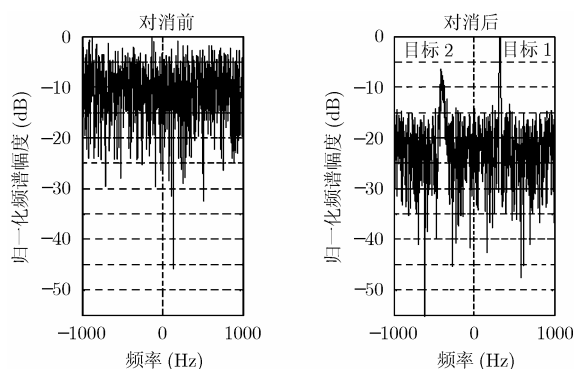


图 5 多目标检测

图 6 示意的是通道失配对杂波抑制效果的影响。左图是在通道完全匹配的情况下, 杂波抑制后的单目标(目标 1)的

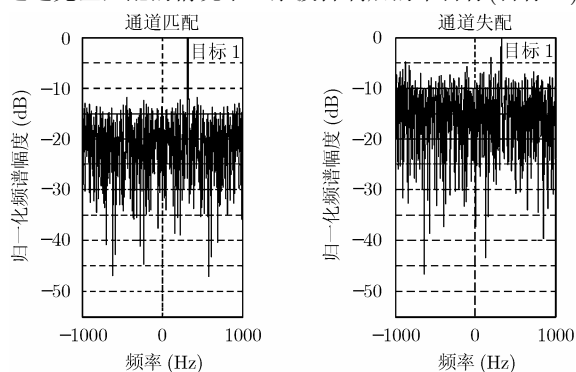


图 6 通道失配的影响

检测图像; 右图是在通道失配的情况下(失配量分别为 $dA = 1.122, d\phi = 0.174\text{rad}$)杂波抑制后的检测图像。比较两图可见, 通道失配使 SCR 损失 8dB 左右, 但仍能检测到动目标。

6 结论

理论分析和仿真结果表明, 本文研究的机载二天线双基地 DPCA 是一种有效的抑制杂波方法, 经过对消处理后系统的输出信杂比可以得到很大的改善。该方法有望应用于解决地基雷达探测低空或超低空飞行目标难题。

参考文献

- [1] Merrill I. Skolnik. Radar Systems. New York: McGraw-Hill Book Co, 2001:161-171.
- [2] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统. 国防工业出版社, 1998:12-31.
- [3] 张英, 李景文. 基于 DPCA 的机载 SAR 动目标检测与定位方法研究. 雷达科学与技术, 2003, 1(4): 223-227.
- [4] A Freeman. A Digital Prefilter for MTI with SAR PROC. ICDSPP' 84 Florence, Italy, Sept. 1984.
- [5] 盛蔚. 合成孔径雷达对地面运动目标检测和成像的关键技术研究. [博士论文], 北京: 北京航空航天大学, 2004.

陈 娟: 女, 1981 年生, 学生, 研究方向为雷达系统和信号处理。
王盛利: 男, 1957 年生, 研究员, 研究方向为雷达系统和信号处理。