

相控阵雷达低仰角目标DOA估计的算法

黎 敏, 何子述, 荆玉兰

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】在相控阵雷达跟踪低仰角目标时,采用频率捷变技术可以有效地减小雷达回波中直射信号和反射信号的相关性,抑制多径效应对目标到达方向估计造成的影响,提高角度估计的精度和性能。再用修正的AR模型算法,不仅可以在此基础上进一步去掉这两种信号的相关性,而且能正确估计出目标和镜像的仰角。计算机仿真实验结果验证了频率捷变和修正AR模型算法理论的正确性,以及在与其它方法比较的情况下,两者结合在去相关性上的优越性和工程实用性。

关键词 频率捷变; 修正的AR模型; 相控阵雷达; 多径效应

中图分类号 TN974 文献标识码 A

An Estimation of Low-Elevation Target DOA in Phased Array Radar

LI Min, HE Zi-shu, JING Yu-lan

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract It is very effective that applying frequency agility to reduce the coherence of the direct and the reflect signal in phased array radar, which are contained in the echo of radar. This method can restrain the influence caused by multipath effect when estimating the target's direction of arrival (DOA), and improve the precision and ability of angle's estimation. Then the application of the modified AR model can not only reduce the coherence of the two signals further, but separate the elevations of the target and its image. The simulation results verify the validity of the theory of frequency agility and modified AR model, as well as the advantage and practicability with the combination of two methods when comparing with other methods.

Key words frequency agility; modified AR model; phased array radar; multipath effect

在低仰角目标的探测和跟踪中,由于存在多径效应,雷达回波中含有直射、镜面反射和散射的信号成分。在平静的海面,镜面反射信号能量较强(忽略散射信号),且与直射信号高度相关,使得雷达对目标作到达方向(Direction of Arrival, DOA)估计发生困难。对此,文献[1]提出用频率捷变(载频在一定频带内随机变化)对回波信号去相关,有效地减小了信号的相关系数,改善低仰角目标DOA估计性能,提高了对目标的跟踪精度。在实际工程中,由于频率捷变带宽范围有限,不可能将相关系数降低到零,并且雷达工作时可用的脉冲数(快拍数)较少,采用修正MUSIC算法可以解决上述问题^[2],进一步降低信号的相关性,改善雷达对目标的角度估计性能,因此本文将在文献[1]和文献[2]的基础上,提出用修正的AR(自回归)模型算法估计目标及其多径的DOA。

收稿日期: 2004-12-16

作者简介: 黎敏(1981-),女,硕士生,主要从事相控阵雷达低空目标DOA估计方面的研究。

1 频率捷变去相关原理

如图1所示的球面反射模型(O 为地心, A 为反射点):

考虑一含有 M 个阵元的均匀线阵(高为 h_a), 在距雷达 R_0 外有一目标(与海平面的垂直距离为 h_t)。线阵接收到目标的回波信号中包含直射信号和经过镜面反射后的信号。设快拍数为 N , 在第 k 次快拍, 线阵中第 m 个阵元接收到的信号为:

$$u_m = a_m(\sin \theta_d, f)S_d(k) + a_m(\sin \theta_r, f)S_r(k) + n_m(k) \quad m=1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中 $S_r(k)$ 和 $S_d(k)$ 分别是直射信号和反射信号的复振幅, 且 $S_r(k) = S_d(k)\rho^{-j\alpha}$; ρ 是反射系数的幅值; α 是反射信号的相移; 设反射系数在处理时间内不随时间变化且在镜面反射模型中, 在较窄频带范围内可以看作常数^[3]; θ_d 为目标仰角; θ_r 是目标镜像的仰角; $n_m(k)$ 是第 m 个阵元接收到的均值为零、方差为 σ^2 的白噪声;

$$\begin{cases} a_m(\sin \theta_d, f) = e^{-j(m-1)\phi_d} \\ \phi_d = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_d \end{cases} \quad (2)$$

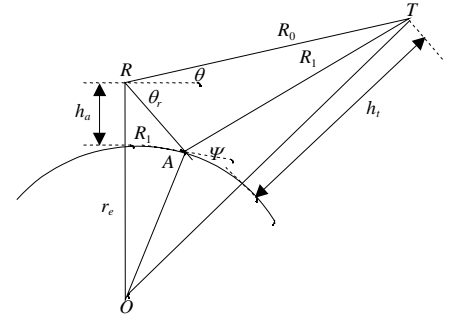


图1 球面反射模型

是直射信号的方向因子; $d = \lambda/2$ 是天线阵元间距; λ 为信号波长。令方向向量

$$\mathbf{a}_d(\sin \theta_d, f) = [1, e^{-j\phi_d}, \dots, e^{-j(M-1)\phi_d}] \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_m(\sin \theta_r, f) = e^{-j(m-1)\phi_r} \\ \phi_r = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_r \end{cases} \quad (4)$$

是反射信号的方向因子, 令方向向量

$$\mathbf{a}_r(\sin \theta_r, f) = [1, e^{-j\phi_r}, \dots, e^{-j(M-1)\phi_r}] \quad (5)$$

反射信号相移

$$\alpha = \frac{2\pi\delta_0}{\lambda} + \phi \quad (6)$$

式中 $\delta_0 = R_1 + R_2 - R_0$ 是直射和反射信号的路程差, R_1 , R_2 分别是目标到地面和地面到线阵的距离。

采用频率捷变技术对直射信号和反射信号去相关, 将式(6)写成:

$$\alpha = \frac{2\pi\delta_0}{\lambda_0} \left(1 + \frac{\Delta f}{f_0}\right) + \phi = \frac{2\pi\delta_0}{\lambda_0} (1 + \beta) + \phi \quad (7)$$

式中 f_0 为中心频率; Δf 为频率偏移; λ_0 是相对于中心频率 f_0 的波长 ($f_0\lambda_0 = c_0$); $\beta = \Delta f/f_0$ 为频率捷变参数。

直射和反射信号的归一化相关系数为:

$$|\gamma|^2 = |E[S_d(k)S_r^*(k)]|^2 / \sigma_d^2 \sigma_r^2 \quad (8)$$

将式(1)代入式(8)再简化得到 $|\gamma|^2 = |E[e^{j\alpha}]|^2$, 其中, $e^{j\alpha} = e^{j[(2\pi\delta_0/\lambda_0)(1+\beta) + \phi]}$ 。取 β 均匀分布在一个长度为 L 的窗内, 即 $[f_0 - L/2, f_0 + L/2]$,

$$|\gamma| = |\text{sinc}(\delta_0 L / \lambda_0)| \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 捷变带宽越宽, 归一化相关系数越小。

2 修正的AR模型用于多径DOA估计算法

采用了频率捷变去相关之后, 可以用传统的AR模型估计出信号的到达方向角度^[4]。由于频率捷变方法在实际工程中并不能完全去掉信号源的相关性; 而且传统的AR模型, 在小信噪比、角度相隔比较近和快拍数较少的情况, 估计效果并不理想。因此, 本文采用修正的AR模型进行DOA估计, 它可以进一步减小相关

信号源的相关系数,改善AR模型的估计性能。且可用Burg叠代算法进行求解,其计算量较小,计算稳健性好。

将接收到的信号写成向量形式,在第 k 次快拍时,

$$\mathbf{U}(k) = \mathbf{A}\mathbf{S}(k) + \mathbf{n}(k) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中 $\mathbf{n}(k)$ 是 M 阶的噪声向量; $\mathbf{S}(k) = \begin{bmatrix} S_d(k) \\ S_r(k) \end{bmatrix}$ 是二阶信号复振幅向量; $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_d(\sin \theta_d, f) \mathbf{a}_r(\sin \theta_r, f)]$ 是 $M \times 2$ 的到达方向(DOA)矩阵。

考虑一个 M 阶自回归(AR)模型(M 为天线阵元数)其Yule - Walker方程可表示为:

$$\mathbf{R}_u \mathbf{b} = \mathbf{v} \quad (11)$$

式中, \mathbf{R}_u 为 $\mathbf{U}(k)$ 的协方差矩阵,可由输入数据向量估计为:

$$\mathbf{R}_u = \mathbf{E}[\mathbf{U}(k)\mathbf{U}^H(k)] \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mathbf{U}(k)\mathbf{U}^H(k) \quad (12)$$

$\mathbf{b} = [1, b_1, \dots, b_{M-1}]^T$ 为AR模型参数向量, $\mathbf{v} = [\sigma^2, 0, \dots, 0]^T$ 是 M 阶列向量, σ^2 为噪声的方差。可对信号相关矩阵 \mathbf{R}_u 作变换。令 \mathbf{J}_M 为 M 阶交换矩阵。则修正的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_u + \mathbf{J}_M \mathbf{R}_u^* \mathbf{J}_M \quad (13)$$

式中 \mathbf{R}_u^* 为 \mathbf{R}_u 的复共轭。在小信噪比和快拍数较少的情况下, \mathbf{R}_u 是用有限次快拍数进行估值,存在估计误差,用 \mathbf{R} 进行信号DOA估计,具有平均意义,可提高信号DOA估计性能。解出 σ^2 ^[4],并将式(13)代入式(11)Yule-Walker方程替换 \mathbf{R}_u , 可得 \mathbf{b} , 并求出空间谱为:

$$\mathbf{b} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v} \quad (14)$$

$$P_{AR}(\omega) = 1 / |\mathbf{b}^H \mathbf{a}(\theta)|^2 \quad (15)$$

式中的方向向量

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-j\phi}, \dots, e^{-j(M-1)\phi}]^T \quad (16)$$

工程上,为提高计算效率,可用Burg叠代算法求解向量 \mathbf{b} 。

3 仿真试验结果

对本文所述的理论,采用Matlab进行仿真,设定实验参数 $R_0 = 74$ km, $h_2 = 1524$ m, 天线高 $h_a = 23$ m, 中心频率 f_0 对应的波长 $\lambda_0 = 0.3281$ m, 天线阵元为20个,直射信号与反射信号的信噪比均为 $SNR = 20$ dB, 反射系数幅值设为 $\rho = 1$, 快拍数为 $N = 25$ 。 r_e 为地球半径,考虑折射后的值为8493.3 km。由图1知,再根据球面多径模型的公式可得^[5]:

目标仰角

$$\theta_d = \sin^{-1} \left(\frac{h_t^2 - h_r^2 + 2r_e(h_t - h_r) - R_0^2}{2r_e(r_e + h_r)} \right) \quad (17)$$

擦地角

$$\psi = \sin^{-1} \left(\frac{2r_e h_a + h_a^2 - R_2^2}{2r_e R_2} \right) \quad (18)$$

镜像仰角

$$\theta_r = \theta_d - \sin^{-1} [R_1 \sin 2\psi / R_0] \quad (19)$$

代入已知参数,得 $\delta_0 = 2.4446$ m, $\theta_d = 1.11^\circ$, $\theta_r = -1.17^\circ$ 。

表1 捷变带宽与归一化相关系数的关系

| 捷变带宽/(%) | 1 | 5 | 10 | 20 |
|--------------------|------|------|------|------|
| 归一化相关系数 $ \gamma $ | 0.99 | 0.79 | 0.31 | 0.21 |

将 $\lambda_0 = 0.3281$ m, $\delta_0 = 2.4446$ m 代入式(9),得到如表1所示的关系。

由表1中可知,捷变带宽越高,去相关效果越好。但工程中,要达到很高的捷变带宽有一定的困难,实际上,5%~10%的捷变带宽已经足够获得良好的去相关

效果了。这里选取频率捷变带宽为10%，归一化的相关系数为0.31。

本文分别用传统的AR模型和修正的AR模型进行多径DOA估计，得出仿真图2和图3。

图2为未采用频率捷变去相关得出的空间谱，设定相关系数为0.99，由于直射信号和反射信号几乎相干，用传统的AR模型得到的空间谱不能分辨出目标与镜像的仰角。

图3为采用频率捷变去相关后的空间谱，其中虚线为传统的AR模型得出的空间谱，实线为修正AR模型得出的空间谱。两种算法都能够将直射信号和反射信号的谱峰分辨出来，但是可以看出修正的AR模型在角度分辨上性能要优于传统的AR模型。

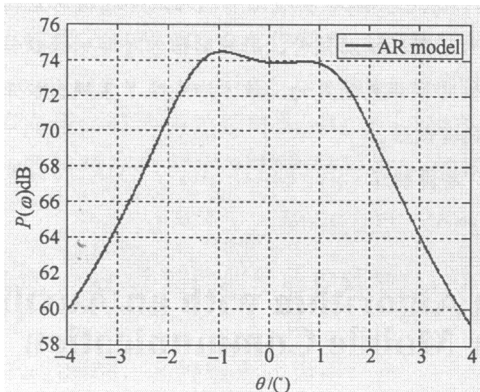


图2 未用频率捷变的空间谱

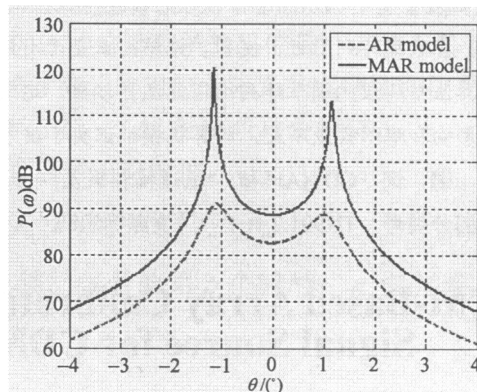


图3 频率捷变之后的空间谱

4 结论

本文介绍了用频率捷变去掉多径信号的相关性，再用修正的AR模型进行信号DOA估计，并与传统的AR模型进行比较。频率捷变不仅具有良好的去相关性能，还可以消除了严重的信号对消现象^[1]，能够改善角分辨力和距离分辨力，提高雷达跟踪精度。而采用修正的AR模型，不用事先确定多径的数目，而只须多径数目不大于AR模型的阶数 M 即可，在小信噪比、快拍少的情况下比传统的AR模型估计性能更好。该方法物理意义明确，工程实用性强，可在高分辨目标跟踪中获得应用。

参 考 文 献

- [1] Yu K B. Recursive super-resolution algorithm for low-elevation target angle tracking in multipath[J]. IEE Proc-Radar, Sonar Navig, 1994, 141(4): 223-228
- [2] 何子述, 黄振兴, 向敬成. 修正的MUSIC算法对相关信号源的DOA估计性能[J]. 通信学报, 2000, 21(10): 14-17
- [3] Kirubarajan T. Radar measurement extraction in the presence of sea-surface multipath[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(2): 550-565
- [4] Haykin S. Adaptive filter theory[M]. Beijing: Prentice Hall, 2002
- [5] Blake L V. Radar handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1990

编辑 徐安玉