

基于数字波束形成的相干标签信号检测方法

陈伟峰¹, 邹欣², 何怡刚¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 河北建筑工程学院计算机网络信息中心, 张家口 075024)

摘要: 以均匀直线阵为基础, 提出一种在相干多径环境下检测标签信号的方法。结合加权空间平滑技术的 MUSIC 算法对相干多径信号的波达方向进行估计, 根据波达角用线性约束最小方差准则调整权值, 通过数字波束形成技术产生自适应定向波束, 达到提高在相干多径环境下检测标签信号成功率的目的。实验结果证明了该检测方法的有效性。

关键词: 标签信号; 加权空间平滑; 波达方向; 数字波束形成

Testing Method of Coherent Tag Signals Based on Digital Beamforming

CHEN Wei-feng¹, ZOU Xin², HE Yi-gang¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082;

2. Computer Network Information Center, Hebei Institute of Architecture Civil Engineering, Zhangjiakou 075024)

【Abstract】 Based on uniform linear array, a testing method of tag signals in the coherent multi-path environment is presented. Followed by weighted spatial smoothing MUSIC algorithm, the Direction Of Arrival(DOA) of coherent multi-path signals is estimated. Based on the DOA, weights are adjusted using Linear Constrained Minimum Variance(LCMV) criterion. By adapting Digital Beamforming(DBF) technique, adaptive directional beam is formed to increase the success rate of testing tag signals in the coherent multi-path environment. Experimental results confirm the availability of the testing method.

【Key words】 tag signals; weighted spatial smoothing; Direction Of Arrival(DOA); Digital Beamforming(DBF)

1 概述

随着射频识别技术的不断深入发展, 超高频段(UHF)射频识别技术^[1]的运用越来越广泛。但由于其具有读写距离远的特点, 空中信号在传输过程中容易受到干扰和削弱。尤其对于采用反向散射调制的标签信号来说, 极易受到噪声和相干多径环境的影响。在这种环境下对标签信号进行检测难度很大, 加上标签信号会有一定的频偏, 一般的基于时域和频域滤波方法很难准确检测出相干的标签信号。

数字波束形成(Digital Beamforming, DBF)技术^[2]主要应用于雷达和移动通信中, 在标签信号检测中可利用各标签空间角度差异, 使用数字波束形成技术实现空域滤波。它的原理是在主波束方向范围内通过检测的标签信号, 在主波束之外的方向范围内滤除或抑制不需要的信号或干扰。因此, 本文提出在超高频段射频识别系统中采用数字波束形成技术对相干标签信号加以检测, 首先通过加权空间平滑技术对相干阵列信号进行解相干从而估计出标签信号源的波达方向(Direction Of Arrival, DOA), 再根据波达角信息得到数字波束形成器的最佳权矢量, 通过加权恢复出标签信号用以检测。

2 自适应阵列信号模型

UHF 频段读写器发送采用 ASK 调制的信号。通过反向散射的标签返回信号同样也采用 ASK 调制^[3], 可表示为

$$S(t) = A_c[1 + m(t)]e^{j(\omega_c t + \phi_c)} \quad (1)$$

其中, A_c 为返回信号幅度; $m(t)$ 为有用信号; ϕ_c 为返回信号的相位。

如图 1 所示, 采用 M 元均匀直线阵, 阵元间距 d 为 $\lambda/2$,

λ 是波长。

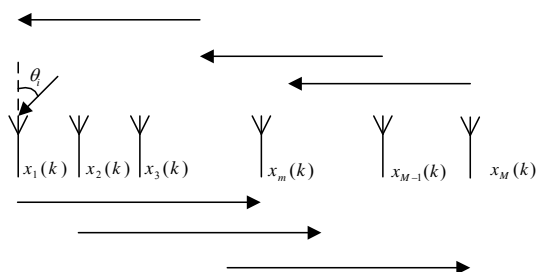


图 1 自适应天线阵列模型

由于读写器读写标签距离远, 标签信号 $S(t)$ 可被认为是远场信号, 其到达各个阵元的方向角视作相同。设有 $N(N < M)$ 个窄带信号源以平面波入射到线阵上, 以线阵轴线法线为参考, 信源方向分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$, θ_i 变化范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。当标签信号相干时:

$$S_i(t) = \alpha_i S_0(t) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中, α_i 为复常数, 因此阵列接收信号向量可表示为

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2006AA04A104); 国家自然科学基金资助项目(50677014); 高校博士点基金资助项目(20060532002); 湖南省科技计划基金资助项目(06JJ2024)

作者简介: 陈伟峰(1975—), 男, 工程师、硕士研究生, 主研方向: 射频系统测试与设计; 邹欣, 助教、硕士研究生; 何怡刚, 教授、博士生导师

收稿日期: 2009-07-03

E-mail: fengpeak2002@yahoo.com.cn

$$\begin{aligned} X(k) &= [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T = A(\theta)S(k) + Z(k) = \\ &A[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]^T S_0(k) + Z(k) \\ k &= 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $S(k)$ 为 $S(t)$ 的取样基带信号; K 为数据采样长度; $A(\theta)$ 为阵列流型; $Z(k)$ 为噪声向量, 即与标签信号源无关的高斯白噪声。根据信号的 DOA 数学模型, 阵列数据的协方差矩阵为

$$R = E[XX^H] = AE[SS^H]A^H + \sigma^2 I = AR_s A^H + \sigma^2 I \quad (4)$$

其中, R_s 是信号的协方差矩阵; $AR_s A^H$ 是信号部分。

3 相干标签信号检测过程

3.1 数字波束形成

基于数字波束形成的 UHF 频段读写器的原理如图 2 所示, 接收信号在中频采样后经过数字下变频到基带, 由基于虚拟仪器技术的平台完成对信号的后续处理。

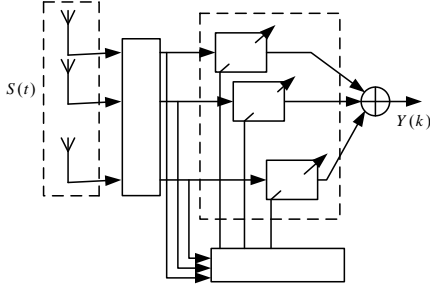


图2 数字波束形成原理

由图 1 自适应阵列模型和图 2 数字波束形成原理可以看出, 对于入射到阵列上的标签信号 $S(t)$, 在阵元 M 上的接收信号向量如式 (3) 所示。而各阵元的权矢量为 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M]^T$, 阵列输出信号为

$$Y(k) = \omega^H X(k) \quad (5)$$

整个阵列输出的平均功率为

$$P_{out} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |Y(k)|^2 = \omega^H R \omega \quad (6)$$

根据期望检测的标签信号 $S_i(t)$ 的波达角 θ_i , 通过数字波束形成技术和线性约束最小方差(LCMV)波束形成算法^[4], 在需要检测的标签信号的波达方向恒定增益条件下使阵列输出功率最小化。最优化准则为

$$\begin{cases} \omega_{opt} = \arg \min_{\omega} P_{out} = \arg \min_{\omega} \omega^H R \omega \\ \text{s.t. } \omega^H a(\theta_i) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

解式(7), 所以波束形成器最佳权值为

$$\omega_{opt} = \mu R^{-1} a(\theta_i) \quad (8)$$

其中, $\mu = 1/[a^H(\theta_i)R^{-1}a(\theta_i)]$; $a(\theta_i)$ 是第 i 个期望标签信号换导向矢量。通过求得最佳权值使输出信号 $Y(k)$ 质量最佳, 器而可以有效地检测出期望标签信号 $S_i(k)$ 。

但是当干扰与期望的标签信号相干时, 在阵元上由于相干信号间相位关系不变, LCMV 波束形成器会将干扰信号和期望信号当作一个来波, 并且使输出功率最小化, 从而无法从干扰中检测出期望标签信号。因此, 针对在相干环境下 LCMV 算法容易失效的问题, 本文提出先用加权空间平滑(WSS)技术^[5]对接收信号协方差矩阵进行加权平滑预处理, 达到解相干的目的; 再用多重信号分类法(MUSIC)准确估计出期望标签信号的波达角 θ_i , 从而为 LCMV 算法正确形成波束指向排除相干干扰。

3.2 基于加权空间平滑技术的DOA估计

加权空间平滑技术具备有效的解相干能力, 并且计算量小, 便于实现。如图 1 所示, 它的基本思想是利用等距线阵的平移不变性, 将阵元分成 p 个相重叠的子阵列, 每个子阵列的阵元数为 m , 将 $\{1, 2, \dots, m\}$ 组成第 1 个子阵列, $\{2, 3, \dots, m+1\}$ 组成第 2 个子阵列, 依次类推。同理, 利用其旋转不变性从后向按类似方法也划分 p 个子阵。则式(4)通过前、后平滑修正后为

$$R^f = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p F_i \hat{R} F_i^H \quad (9)$$

$$R^b = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p Q_i \hat{R} Q_i^H \quad (10)$$

其中, $F_i = [0_{m \times (i-1)} \mid I_{m \times m} \mid 0_{m \times (p-i)}]$; $Q_i = [0_{m \times (i-1)} \mid J_{m \times m} \mid 0_{m \times (p-i)}]$; $I_{m \times m}$ 为置换矩阵; $J_{m \times m}$ 是反对角线为 1 的置换矩阵。分别将前向和后向协方差矩阵中所有 p^2 个 m 阶子矩阵进行加权平均, 协方差矩阵由下式构成:

$$R_w^b = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p F_{ij} \hat{R} F_{ij}^H W_{ij}^f + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p Q_{ij} \hat{R} Q_{ij}^H W_{ij}^b \quad (11)$$

其中, 上标*表示矩阵共轭; W_{ij}^f, W_{ij}^b 为加权系数。最优加权矩阵的选取应该满足:

$$W = (B B^H)^+ \quad (12)$$

其中, 上标+表示矩阵的 Moore-Penroser 伪逆; B 为构造的阵列流型, 可通过常规波束形成对标签信号 DOA 粗估来构造。再根据式(11)对 R 进行特征值分解, 有

$$R_w^b = U_s \Sigma_s U_s^H + U_z \Sigma_z U_z^H \quad (13)$$

其中, U_s 是信号子空间; U_z 是噪声子空间。考虑到实际接收数据矩阵是有限长的, 数据协方差矩阵的最大似然估计为

$$\hat{R} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K X X^H \quad (14)$$

由于噪声的存在, $a(\theta_i)$ 与 \hat{U}_z 并不能完全正交, 因此实际上求 DOA 是以最小优化搜索实现的, 即

$$\theta_{MUSIC} = \arg \min_{\theta} a^H(\theta) \hat{U}_z \hat{U}_z^H a(\theta) \quad (15)$$

多重信号分类(MUSIC)算法^[6]的谱估计公式为

$$P_{MUSIC} = \frac{1}{a^H(\theta_i) \hat{U}_z \hat{U}_z^H a(\theta_i)} \quad (16)$$

式(16)中分母取最小值时将产生对应的峰值, 从而由各谱峰可对标签信号的波达角 $\theta_i (i=1, 2, \dots, N)$ 作出估计; 将正确估计出的标签信号波达角 θ_i 代入式(8)从而获得最佳权值 ω_{opt} 。

4 实验分析

在实验 1、实验 2 中, UHF 频段读写器采用 6 阵元均匀线阵, 工作频率为 915 MHz, 阵元间距 $d = \lambda/2$ 。

实验 1 采用 3 个信号源, 使用基于虚拟仪器技术的标签仿真器产生标签的相干和多径干扰信号源。其中, $s_2(t)$ 是标签信号; $s_1(t)$ 是与 $s_2(t)$ 相干的多径干扰信号; $s_3(t)$ 是不相关的另一标签信号。3 个信号到达角分别为 $\theta_1 = -40^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = 45^\circ$, 信噪比为 10 dB。

图 3 为经典 MUSIC 方法对信号处理的结果。由图 3 可以看出, 对于相干的 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 不能估计出波达角, 而对独立的 $s_3(t)$ 则能准确地估计出波达角。如图 4 所示, 采用加权双向空间平滑技术的 MUSIC 算法, 能准确地估计出 3 个信号的波达角, 可见其较好的去相关性, 从而把多个相关信号

区分开来。由实验分析可知,在相干多径环境下,本文提出的基于加权空间平滑技术检测标签信号波达角方法的有效性要远远好于经典 MUSIC 方法,与之相比有更强的实用性,可以大大提高检测相干标签信号的成功率。

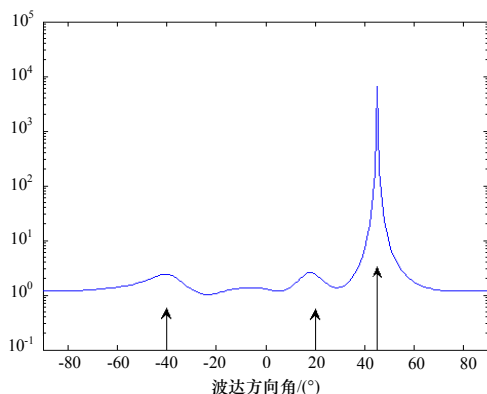


图3 经典 MUSIC 算法结果

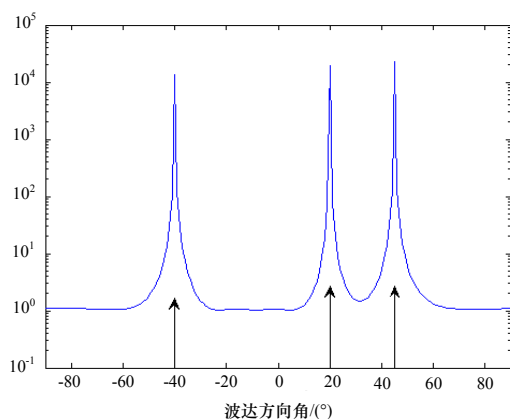


图4 结合加权空间平滑技术的 MUSIC 算法结果

实验2 用标签仿真器分别产生2个相干标签信号源,距离天线阵列为4.1 m,信噪比为6 dB,分别以不同波达角到达天线阵列。

实验过程中不断地减小2个信源波达角间隔,实验结果显示当入射角度间隔 $\geq 5^\circ$ 时,可以精确地提取信号的波达角。如图5所示,当2个相干信源入射角度为 $\{-4^\circ, 1^\circ\}$,波达角间隔为 5° 时,仍然能够准确地提取2个相干信号的波达角。由实验可知本文的标签信号检测方法能有效地估计出相隔比较近的小信噪比的相干信号的 DOA,具有较好的分辨能力。

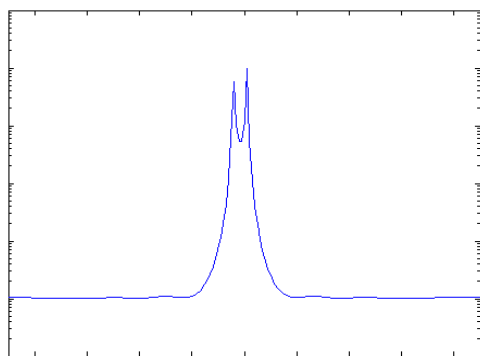


图5 2个相干信号源时的分辨能力

实验3 UHF 频段读写器采用16阵元均匀线阵,工作频率为915 MHz,阵元间距为 $d = \lambda/2$ 。期望标签信号波达方向角为 60° ,相干干扰信号波达方向角为 14° ,非相干干扰信号波达方向角为 29° ,信噪比为10 dB。

如图6所示,LCMV波束形成器分别在 14° 和 29° 干扰方向产生了零陷,并且把主波束对准了 60° 的期望标签信号方向。因此可以看出,用本文提出的经过加权空间平滑解相干处理的 MUSIC 谱估计方法有很好的去相干能力;LCMV波束形成器用其估计出的标签信号波达角(DOA)调整权值,能形成主波束准确指向期望标签信号来波方向,同时能在干扰方向产生零陷。

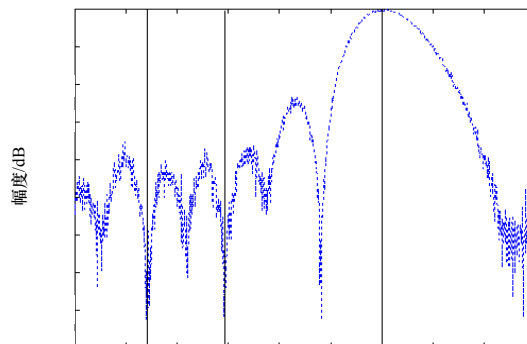


图6 LCMV 自适应阵列方向图

5 结束语

针对相干标签信号难以精确检测的问题,本文提出了采用数字波束形成技术的方法加以解决。由于相干干扰的存在,普通的线性约束最小方差准则(LCMV)难以区分出期望标签信号。本文用加权空间平滑技术去相干,再用 MUSIC 算法检测出期望标签信号的 DOA;根据信号波达角用 LCMV 波束形成器调整权值,产生指向期望标签信号来波方向的定向波束,从而精确检测出标签信号。实验分析证明了该检测方法具有去除标签信号相干多径干扰的能力和较好的信号波达角分辨能力。

参考文献

- [1] Finkenzeller K. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [2] Torres-Rosario J A. Implementation of a Phased Array Antenna Using Digital Beamforming[D]. Mayaguez, USA: University of Puerto Rico, 2005.
- [3] ISO/IEC. ISO 18000-6-2006 Information Technology——Radio Frequency Identification for Item Management —— Part 6: Parameters for Air Interface Communications at 860 MHz to 960 MHz AMENDMENT 1: Extension with Type C and Update of Types A and B[S]. 2006.
- [4] Van Veen B D. Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering[J]. IEEE Acoust Speech Signal Processing Magazine, 1988, 5(2): 4-24.
- [5] 王布宏,王永良,陈辉.相干信源波达方向估计的加权空间平滑算法[J].通信学报,2003,24(4):31-40.
- [6] Schmidt R O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation[J]. IEEE Trans. on AP, 1986, 34(3): 276-280.

编辑 任吉慧