

基于单次快拍的自适应天线阵互耦效应分析与校正

高 雪, 胡鸿飞, 傅德民

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文基于天线阵列的单次快拍数据, 分析和校正了自适应天线的单元互耦效应. 文中首先阐述了基于单次快拍数据的信号处理方法, 介绍了构造权矢量法方程的方法, 给出了系统恢复期望信号的表达式和形成自适应方向图的公式. 采用矩量法互耦分析模型和“前向”方法, 分析互耦对系统性能的影响. 提出校正互耦的方法, 给出了具体的计算方法和简洁的表达式. 最后分别模拟了在强、弱干扰的环境下, 互耦对系统分辨率和输出方向图的影响, 并验证了本文方法校正互耦的效果.

关键词: 矩量法; 单次快拍数据; 互耦; 分析; 校正

中图分类号: TN82 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2002)06-0922-03

Analysis and Compensation of the Effect of Mutual Coupling on the Performance of Adaptive Arrays with Single Snapshot Data

GAO Xue, HU Hong-fei, FU De-min

(Key Lab of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Based on a single snapshot data, the effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays is studied. Firstly, the signal processing method based on a single snapshot data is demonstrated, the method of constructing the equations for solving the weight is introduced, and the expression for the reconstructed desire signal and the formula for the adaptive pattern are given. Then, applying the MOM analytic model and the “forward” method, the effect of mutual coupling between elements is analyzed. The method of mutual coupling compensation in adaptive arrays is proposed. Finally, the effect of mutual coupling on the resolution and the output pattern of adaptive system and the compensation results of the given methods in this paper are simulated with existence of strong or weak interference.

Key words: method of moments; single snapshot data; mutual coupling; analysis; compensation

1 引言

自适应天线广泛地应用于雷达和无线通讯系统中, 特别是第三代移动通信技术的发展又为自适应天线提供了新的发展契机和更高的技术要求. 对于自适应阵列的研究, 在进行信号处理时往往假设各单元接收到相同幅度、相位与单元排列顺序成线性关系的来波信号, 这是以各单元之间不存在互耦为前提的, 与实际应用的情况并不相符, 从而造成系统不能达到期望的最佳设计效果. 在天线的分析和设计过程中, 天线互耦是一个不可忽视的问题, 但一般研究的重点在于分析互耦对天线驻波比和增益的影响, 没有综合考虑互耦对整个自适应天线系统的影响. 文献[1]用广义网络模型和谱方法来分析互耦对自适应天线的信号干扰噪声比和暂态特性的影响, 但是所用的谱方法基于信号的多次快拍数据, 当干扰信号是间歇的或者由传播路径相干引起的, 或者干扰的统计特性在短时间内出现强振荡时, 谱方法基于多次样本, 很难得到稳定的统计数据, 而且广义网络模型相对于阵列的实际情况存在一定的近似.

在信号环境不稳定、变化剧烈或对实时性要求较高的场合, 要求阵列在少数信息, 甚至基于单次快拍数据做出反应,

由于已知信息量较少, 所以对算法的要求更苛刻、更复杂. 近年来, 出现了基于单次快拍数据的信号处理方法^[2~5], 该方法计算量和内存需求量小, 处理速度快, 更适合实时工作的需要. 本文在信号干扰噪声比最大的准则下, 基于单次快拍数据构造求解权矢量的法方程, 形成自适应波束并恢复期望信号, 进而分析在这一过程中, 阵列单元间互耦对自适应系统性能的影响, 并提出校正互耦的方法, 分别模拟了在强、弱干扰的环境中互耦对系统的影响和本文方法的校正效果.

2 基于单次快拍的信号处理方法

以 $M+1$ ($M=2M'$) 个半波振子组成的均匀直线阵(见图

1) 为例, 基于阵列天线在第 t 个快拍时刻所获得的数据信息, 计算在最大信号干扰噪声比准则下的优化权矢量. 为方便起见, 设入射到阵列口径上的信号包括 1 个期望信号和 K 个干扰信号, 其中期望信号的幅度为 A_d 、已知的入射方向为 $(\theta_d = 90^\circ, \varphi_d)$, 干扰信号的幅度为 A_{ik} ,

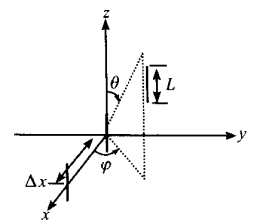


图1 天线阵的结构及坐标关系

入射方向为 $(\theta_k = 90^\circ, \varphi_k)$ ($k = 1, \dots, K$, 且 $K \leq M$), 设系统噪声信号为均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声。那么在第 n ($n = 1, \dots, M+1$) 个单元上所接收的期望信号电压、干扰信号电压和高斯白噪声电压的总和为 $V_{in} = V_{dn} + V_{in} + V_{en}$ 。将信号 $V_{in} - V_{dn}$ 适当排列组合, 构成 $M \times (M+1)$ 维矩阵, 该矩阵与权矢量相乘为 0, 因此可以得到 M 个方程

$$\begin{bmatrix} V_{d1} - V_{d1} & \dots & V_{i, M+1} - V_{d, M+1} \\ \vdots & & \vdots \\ V_{i, M+1} - V_{d, M+1} & \dots & V_{i, M+1} - V_{d, M+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_{M+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

对天线的接收能量进行约束, 即设 $M+1$ 个单元在 $(\theta_d = 90^\circ, \varphi_d)$ 方向的增益为 C , 可以得到另一个方程 $\sum_{i=1}^{M+1} w_i \gamma^{i-1} = C$, 其中 $\gamma = \exp(jk_0 \Delta x \cos \varphi_d)$, 从而有

$$\begin{bmatrix} 1 & \gamma & \dots & \gamma^M \\ V_{d1} - \gamma^{-1} V_{i2} & V_{d2} - \gamma^{-1} V_{i3} & \dots & V_{i, M+1} - \gamma^{-1} V_{i, M+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{dM} - \gamma^{-1} V_{i, M+1} & V_{dM+1} - \gamma^{-1} V_{i, M+2} & \dots & V_{dM} - \gamma^{-1} V_{i, M+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{M+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式即为约束权矢量的法方程。求解该式得到权矢量, 可进一步获得系统恢复期望信号的表达式和自适应波束方向图分别为

$$A_d = \frac{1}{C} \gamma^{-1} \sum_{n=1}^{M+1} w_n V_{i, n+l}, \quad l = 0, \dots, M \quad (3)$$

$$\text{Beam}(\varphi) = \sum_{n=1}^{M+1} w_n V_{in}(\varphi) \quad (4)$$

上述方法基于阵列单次快拍的前向样本, 称为“前向”方法。本文采用该方法分析和校正互耦效应。

3 自适应阵列天线的互耦效应分析与校正

3.1 自适应天线的互耦效应分析

上述基于单次快拍的方法中, 所有的信号电压都表示阵列理想工作时(即接收信号和权矢量都未考虑互耦作用)所接收到的入射波电压, 分析互耦效应时, 需要计算阵列天线所接收的实际工作电压, 然后再计算系统的恢复期望信号和自适应波束。矩量法是分析阵列天线互耦问题的一种比较精确、广泛采用的方法, 所以本文采用该模型, 并且在分析中考虑了单元端口的等效负载作用。

在图 1 中, 设强度为 E_0 的均匀平面波相对于坐标原点 o 以 (θ, φ) 的角度入射, 则空间任意一点 $r(x, y, z)$ 的入射波切向分量为 $E_z^{inc} = E_0 e^{-jk \cdot r}$, 上式中 $k = -k_0(\hat{x} \sin \theta \cos \varphi + \hat{y} \sin \theta \sin \varphi + \hat{z} \cos \theta)$, $r = \hat{x}x + \hat{y}y + \hat{z}z$ 。我们以这种情况为例来说明求解实际工作电压的几个关键问题。首先, 在建立分析模型时, 在天线的导体表面采用等效电流模型, 在天线单元端口的等效负载处采用等效磁流环模型, 从而得到了包括馈源端口的等效负载效应的天线电场积分方程

$$\frac{1}{j\omega \epsilon_0} (k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}) \int_{-L/2}^{L/2} I(z') G(R) dz' - Z_L I(0) \delta(z) = -E_z^{inc} \quad (5)$$

其中 $I(\cdot)$ 表示天线上的电流分布函数, Z_L 为单元端口的等效负载, $\delta(\cdot)$ 表示脉冲函数。其次, 在选取基函数时, 充分考虑到分析互耦效应这一问题的特点, 天线单元上采用奇数个分段正弦函数, 并应用 Galerkin 法得到以电流展开系数 I_{mq} 为未知量的矩阵方程

$$[Z_{ip, mq}]_{(M+1)N \times (M+1)N} [I_{mq}]_{(M+1)N \times 1} = [V_{ip}]_{(M+1)N \times 1} \quad (6)$$

式中 $Z_{ip, mq}$ 表示第 ip 个源点和第 mq 个场点之间的广义阻抗, V_{ip} 表示第 ip 个源点的入射波等效电压, $M+1, N$ 分别为单元个数和各单元上基函数个数, 下标序号 $mq = (m-1) \times N + q$, $m = 1, \dots, M+1$, $ip = (n-1) \times N + p$, $n = 1, \dots, M+1$ 。针对该维数较高的复矩阵方程, 本文采用共轭梯度方法, 可以快速求解电流展开系数。然后, 根据各单元端口的阻抗与电流的关系, 得到第 m 个单元上的入射波电压 V_m^{inc} 和实际工作电压 V_m^{work} 分别为

$$V_m^{inc} = \int_{-L/2}^{L/2} f_{mq'}(z) E_z^{inc}(z) dz \quad (7)$$

$$V_m^{work}(\theta, \varphi) = Z_L I_{mq'} \quad (8)$$

其中 $f_{mq'}(z)$ 表示第 mq' 段所对应的基函数, $mq' = (m-1) \times N + q'$, $q' = (N+1)/2$ 。采用“前向”方法计算权矢量, 并分别对 V_m^{inc} 、 V_m^{work} 进行处理, 进一步获得系统的恢复期望信号幅度及波束方向图, 从而可以考察互耦对系统性能的影响。

3.2 自适应天线的互耦效应校正

采用“前向”信号处理方法校正自适应天线阵的互耦效应, 首先要对接收数据去耦。基于单次快拍数据, 各单元端口的实际工作电压 V_m^{work} 可以通过测量得到, 根据上节的内容建立同入射波电压 V_{np}^{inc} 的关系

$$[V_m^{work}]_{(M+1) \times 1} = Z_L [Y_{mq', np'}]_{(M+1) \times (M+1)N} [V_{np}^{inc}]_{(M+1)N \times 1} \quad (9)$$

其中 $[Y_{mq', np'}]$ 是 $[Z_{ip, mq}]^{-1}$ 的子阵, 可以根据阵列结构预先求得。上式形式上是一个欠定方程组, 通常的方法如高斯消去法、奇异值分解法和共轭梯度迭代法都不适用于求解该方程组。经研究发现, 当期望信号和干扰信号从相同的 θ 角入射时, 列向量 $[V_{np}^{inc}]$ 各元素之间并不是互相独立的, 对于同一单元上的入射波电压有 $V_{i+1}^{inc} = e^{jk_0 \Delta z \cos \theta} V_i^{inc} = \alpha V_i^{inc}$, 利用该信息可以进一步将式(9)变换为一个适定性的方程组

$$[V_m^{work}]_{(M+1) \times 1} = Z_L [\hat{Y}_{mq', np'}]_{(M+1) \times (M+1)} [V_{np}^{inc}]_{(M+1) \times 1} \quad (10)$$

其中 $\hat{Y}_{mq', np'} = \sum_{p=1}^N \alpha^{p-2} Y_{mq', np}$, $np' = (n-1) \times N + p'$, $p' = (N+1)/2$ 。这样可以用常规的数值方法求解 $[V_{np}^{inc}]_{(M+1) \times 1}$, 进而获得去耦数据 V_{np}^{inc} , 然后将其代入到“前向”方法中, 计算校正互耦权矢量。

4 仿真研究

考虑 7 单元的自适应阵列, 单元间距为 $\lambda/2$, 设系统同时接收到初相相同的 1 个期望信号和 3 个干扰信号, 波达方向 (θ, φ) 分别为 $(90^\circ, 45^\circ)$ 、 $(90^\circ, 75^\circ)$ 、 $(90^\circ, 60^\circ)$ 、 $(90^\circ, 30^\circ)$ 。

例 1 为弱干扰的环境, 设期望信号的幅度从 0.0- 20.0dB 均匀增加, 3 个干扰信号的幅度分别为 0.0dB、3.5dB、6.0dB, 结果如由图 2、3、4 所示, 与理想工作的情况相比, 在互耦影响的情况下, 系统不能准确地分辨出期望信号的幅度, 而且系统

所恢复的期望信号幅度已经不随输入期望信号幅度呈线性关系, 两者之差最大值达 28.1dB. 应用本文方法校正互耦后, 系统能够抑制干扰信号的影响, 从而准确恢复出期望信号, 校正后的结果与系统理想工作的情况基本一致.

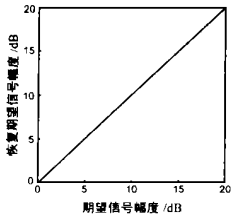


图 2 理想工作的情况

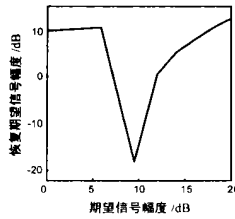


图 3 考虑互耦的情况

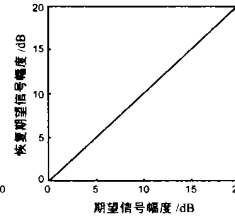


图 4 校正互耦的情况

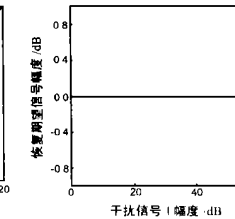


图 5 理想工作的情况

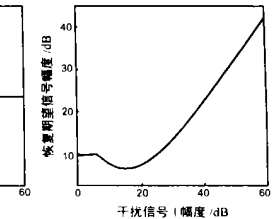


图 6 考虑互耦的情况

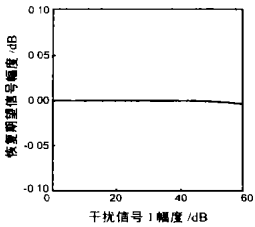


图 7 校正互耦的情况

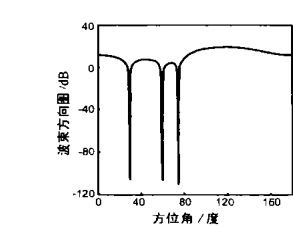


图 8 理想工作的情况

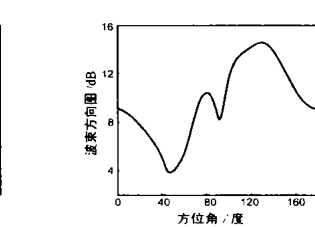


图 9 考虑互耦的情况

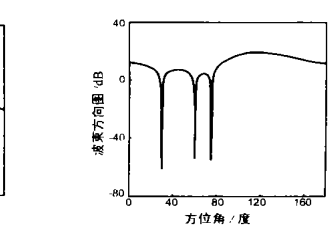


图 10 校正互耦的情况

例 2 为强干扰的环境, 设期望信号和干扰信号 2、3 的幅度分别为 0.0dB、3.5dB、6.0dB, 干扰 1 的幅度从 0.0- 60.0dB 均匀增加. 如图 5、6、7 所示, 相对于理想工作的情况, 在考虑互耦影响的情况下, 强干扰使得系统的性能进一步下降, 而且基本上是干扰信号越大, 所恢复的期望信号与输入期望信号之间的差值越大, 其中最大差值达 41.8dB, 这已经大大超过了工程应用所允许的限度. 应用本文方法校正互耦后, 恢复期望信号幅度与已知期望信号幅度的最大相对误差不超过 0.004dB.

参考文献:

[1] 杨超, 邱文杰. 自适应天线中阵元间互耦的校正 [J]. 电子学报, 1993, 21(4): 58- 62.
 [2] 马常霖. 单次快拍阵列测向技术的实现 [D]. 北京: 清华大学, 1998.
 [3] T K Sarkar. A pragmatic approach to adaptive antennas [J]. IEEE Antennas and Propagat Magazine, 2000, 42(2): 39- 55.
 [4] T K Sarkar, S Nagaraja, M C Wicks. A deterministic direct data domain approach to signal estimation utilizing uniform 2-D arrays [J]. Digital Signal Processing, A Review Journal, 1998, 8(2): 114- 125.
 [5] R S Adve, T K Sarkar. Compensation for the effects of mutual coupling on direct data domain adaptive algorithms [J]. IEEE Trans AP, 2000, 48(1): 86- 94.

作者简介:



高雪女, 1976 年出生于辽宁, 西安电子科技大学 2000 级博士生, 分别于 1998 年和 2001 年获得该校电磁场与微波技术专业学士和硕士学位, 目前主要研究兴趣为智能天线与信号处理、实用天线的分析与设计和电磁场数值计算.



胡鸿飞男, 1972 年出生于安徽, 2000 年在西安电子科技大学获电磁场与微波技术专业硕士学位, 并于 1999 年免试提前攻读该专业博士学位. 主要研究兴趣为近场测量技术、天线数值分析和设计、智能天线技术.

例 3 设期望信号幅度和干扰信号的幅度分别保持 0.0dB、0.0dB、3.5dB、6.0dB, 考察阵列的输出方向图, 讨论互耦影响系统性能的原因. 由图 8、9、10 可见, 在理想情况下, 波束方向图能够对干扰信号准确地形成较深的零陷, 对期望信号形成波束最大值, 从而抑制干扰对系统的影响, 保证系统较高分辨率; 在受互耦影响情况下, 波束方向图既不能在干扰信号方位角附近形成较深的零陷, 也不能在期望信号方位角附近形成极大值, 所以自适应系统中忽略互耦的影响将导致系统灵敏度的下降. 图 10 表明校正互耦时, 波束方向图能够对准干扰方向形成较深的零陷, 并在期望信号方向产生最大值.

5 结束语

本文基于自适应天线的单次快拍数据, 分析和校正了自适应阵列的单元互耦效应. 阐述了“前向”方法结合矩量法分析互耦对系统性能影响的方法, 其中矩量法的互耦分析模型包括了馈电网络和开路单元互耦对系统接收信号的影响. 同时提出了相应的校正互耦的方法. 分别模拟了系统在弱干扰和强干扰的环境中, 互耦对系统分辨能力的影响和本文方法的校正效果, 讨论了互耦影响系统性能的原因.