

一种新的阵列通道失配仿真模型

王瑛 王飞雪

(国防科技大学电子科学与工程学院卫星导航定位研发中心 长沙 410073)

摘要: 该文提出一种阵列通道失配仿真模型, 该模型由4个子滤波器级联构成, 各个子滤波器分别控制幅度起伏、带宽、群延迟起伏和平均群延迟偏差等滤波器指标。设计结果表明, 该模型具有设计准确、可控性强的特点, 适用于自适应阵列通道失配的仿真。

关键词: 自适应阵列, 通道失配, 滤波器指标

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)11-1845-04

A New Array Channel Mismatch Model for Simulations

Wang Ying Wang Fei-xue

(*Satellite Navigation and Positioning R&D Center, School of Electronic Science and Engineering,
National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

Abstract A new array channel mismatch model for simulations is proposed. The model consists of four sub-filters which separately control the four specifications of channels: amplitude variation, bandwidth, group delay variation and absolute delay offset. It is shown from design results that the channel mismatch model proposed is accurate and flexible, hence the model is suitable for the simulations of adaptive arrays.

Key words Adaptive array, Channel mismatch, Filter specification

1 引言

自适应阵列主要采用数字波束形成技术, 具有自适应干扰置零、超分辨定向、天线自校准和超低副瓣等优点, 因而在雷达、通信等领域得到广泛应用^[1]。实际系统中, 自适应阵列的各阵元通道在A/D变换之前包含低噪放、变频器等模拟器件, 这些器件难以做到幅相特性完全一致, 从而导致通道失配。通道失配会降低自适应阵列性能^[2,3], 在通道失配的理论研究中, 有必要建立比较准确、可控性好的仿真模型。

目前的研究中, 通道失配模型大致可分为3类。第1类是直接利用通道的频率响应描述通道特性^[3,4], 以通道幅度起伏峰峰值和起伏数、通道相位起伏峰峰值和起伏数、时延等为研究对象, 符合系统实际情况, 便于理论推导; 但该模型较难应用于仿真, 主要是因为精确地设计任意频率响应的滤波器比较困难。第2类是零极点扰动模型^[5,6], 即利用零极点(或滤波器系数)随机扰动的滤波器来描述通道特性; 这类模型简单易用, 便于仿真实现。但是, 由于零极点扰动与频率响应没有明确的对应关系, 该模型难以保证零极点扰动后仍然满足滤波器指标要求。第3类是基于滤波器逼近的仿真模型^[7], 即利用设计参数(如滤波器阶数、通带波纹等)随机改

变的滤波器来描述通道特性; 这类模型通过通带波纹和滤波器阶数控制通道幅度起伏峰峰值和起伏数、通道相位起伏峰峰值和起伏数, 易于仿真实现。但该模型基于经典的IIR滤波器(如Chebyshev滤波器), 难以保证滤波器的最大平坦群延迟特性; 而且一个设计参数的改变将会影响多个滤波器指标(如阶数改变将影响通道幅度起伏数、通道相位起伏数、带宽等), 难以灵活地控制通道特性。

针对上述模型存在的问题, 本文提出了一种基于滤波器级联描述的通道失配仿真模型; 模型中各通道均由4个滤波器级联构成, 分别控制该通道的幅度起伏、带宽、群延迟起伏、平均群延迟偏差等性能指标。该模型不但能够描述各通道之间幅相特性的不同, 而且能够保证各通道都符合性能指标, 具有设计准确、可控性强的特点。

2 通道失配仿真模型

基于滤波器级联描述的通道失配仿真模型本质上是一种直接利用频率响应描述通道特性的模型, 但是该模型在描述精确度和实现难度之间作出了合理的折衷, 具体表现为:

(1) 用滤波器性能指标描述通道特性, 比用频率响应描

述通道特性要粗略,但是相应滤波器设计参数的选取比较简单。

(2) 利用级联滤波器的子滤波器互不影响地控制各项性能指标,比用复杂算法设计单个滤波器要方便。

图1给出了通道失配仿真模型的原理图,模型由两个线性相位FIR滤波器和两个全通滤波器级联构成。下面,详细介绍通道模型的各个子滤波器和相应的滤波器设计问题。

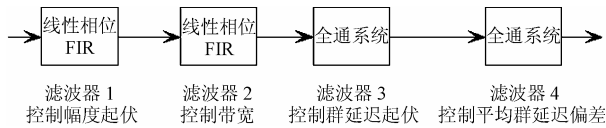


图1 通道失配仿真模型

模型中滤波器1用于控制通带内的幅度起伏,对应的性能指标为通道的通带幅度起伏峰峰值和起伏数。设计时要求它的幅频响应在整个频带内在0dB左右起伏;同时具有线性相位特性使得它不会影响滤波器3控制通带群延迟起伏的效果。这里选择Parks-McClellan算法^[8,9]设计滤波器1,因为该算法能够设计线性相位FIR滤波器逼近幅频响应的起伏。必须指出,滤波器1的幅频响应的起伏将对通道的阻带衰减产生影响,在确定滤波器2的阻带衰减时需要考虑并补偿该影响。

滤波器2用于控制带宽,对应的性能指标为通道的通带截止频率、阻带截止频率和阻带衰减。设计时要求它的通带波纹很小,不至于影响滤波器1控制通带幅度起伏的效果;同时,具有线性相位特性不会影响滤波器3控制通带群延迟起伏的效果。利用Parks-McClellan算法能够设计出符合以上要求的最佳等波纹逼近FIR滤波器,且滤波器阶数较低^[8,9]。

滤波器3用于控制通带内的群延迟起伏,对应的性能指标为通道的通带群延迟峰峰值和起伏数。设计时要求它的群延迟响应在通带内在某个常数左右起伏;同时具有全通特性使得它不会影响滤波器1和滤波器2控制幅频响应的效果。

这里选择最小 p -范数约束优化算法^[10]设计滤波器3,因为该算法能够设计全通滤波器逼近群延迟响应的起伏。必须指出,滤波器3无法控制平均群延迟,需要由滤波器4实现控制。

滤波器4用于控制通带内的平均群延迟偏差,对应的性能指标为通道的通带平均群延迟偏差。设计时要求它的通带内群延迟平坦;同时,具有全通特性不会影响滤波器1和滤波器2控制幅频响应的效果。整数延迟滤波器只需要延迟单元,分数延迟滤波器则可以利用Thiran算法实现^[11]。

通道失配仿真模型由以上4个滤波器级联构成,每个子滤波器控制一部分性能指标,从而降低了滤波器设计的难度。利用上述模型,可以方便地控制通道的幅度起伏、带宽、群延迟起伏、平均群延迟偏差等指标,有利于准确描述自适应阵列的通道失配。当然,仿真模型的滤波器阶数可能会比较高,但是对于仿真应用不会存在较大问题。

3. 设计举例

3.1 单个通道设计举例

待设计的天线阵的某个通道的性能指标为:通带截止频率{8MHz, 16MHz},阻带截止频率{7.8MHz, 16.2MHz},阻带衰减30dB,通带幅度起伏峰峰值2dB,幅度起伏数4,通带群延迟起伏峰峰值9ns,群延迟起伏数3,通带平均群延迟偏差6ns。仿真时采样率48MHz。

根据前面分析,确定各个子滤波器的设计参数如表1所示,设计子滤波器以及级联后通道的幅频响应和群延迟响应如图2所示。从表1和图2可以看出,各个子滤波器能够分别控制滤波器各项指标,保证级联后的通道模型符合设计要求。

3.2 两个通道设计举例

待设计的天线阵的第1个通道的性能指标与3.1节相同,

表1 各个子滤波器的设计参数

	设计参数	实现算法
滤波器1	通带幅度起伏峰峰值2dB,幅度起伏数4,阶数100	Parks-McClellan
滤波器2	通带截止频率{8MHz, 16MHz},阻带截止频率{7.8MHz, 16.2MHz},通带波纹0.001dB,阻带衰减32dB	Parks-McClellan
滤波器3	通带群延迟起伏峰峰值9ns,群延迟起伏数3,阶数16	least- p th constrained optimization
滤波器4	通带平均群延迟偏差6ns,阶数50	Thiran

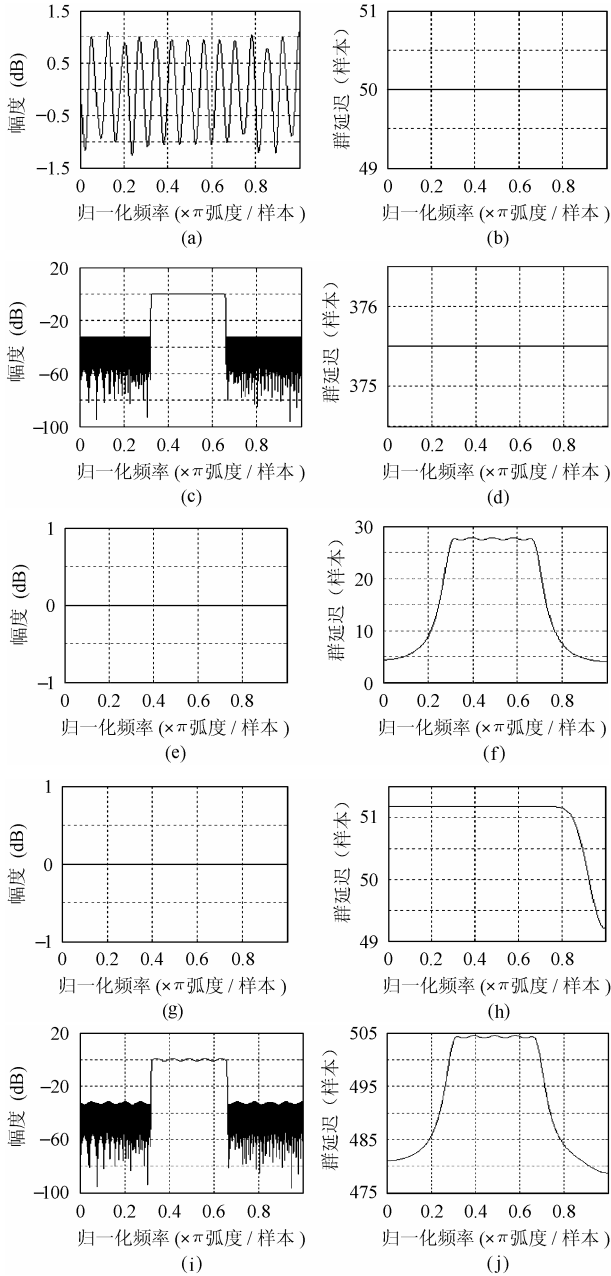


图 2 单个通道设计举例

(a)(b), (c)(d), (e)(f), (g)(h) 分别对应滤波器 1-4 的幅频响应和群延迟响应; (i)(j) 对应整个通道的幅频响应和群延迟响应

第 2 个通道的性能指标为：通带截止频率{8MHz, 16MHz}，阻带截止频率{7.8MHz, 16.2MHz}，阻带衰减 30dB，通带幅度起伏峰峰值 2.5dB，幅度起伏数 2，通带群延迟起伏峰峰值 3ns，群延迟起伏数 5，通带平均群延迟偏差 12ns。仿真时采样率 48MHz。

类似 3.1 节分别设计两个通道，各个子滤波器的设计参数不再赘述，设计出的通道的幅频响应和群延迟响应如图 3 所示。可以看到，在保证两个通道都符合性能指标的前提下，基于滤波器级联描述的通道失配仿真模型准确地描述了通道之间幅频特性和群延迟特性的失配情况。

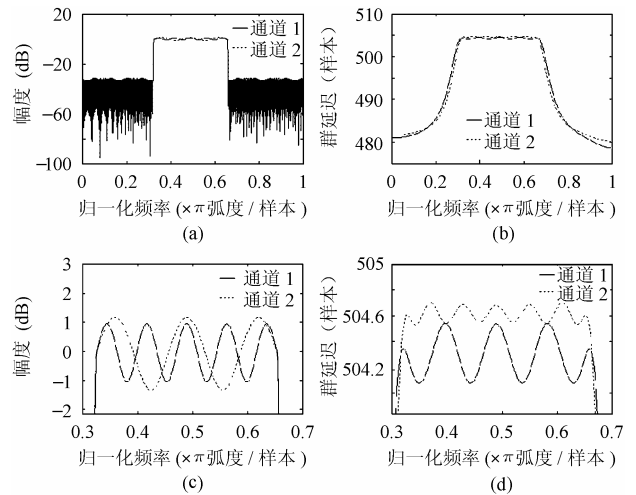


图 3 两个通道设计举例

(a)(b) 对应通道的幅频响应和群延迟响应

(c)(d) 为通带局部放大的效果

为了比较本文提出的仿真模型与其他模型的区别，下面利用零极点扰动模型和基于滤波器逼近的仿真模型描述两个通道，设计出的通道幅频响应和群延迟响应如图 4，图 5 所示。

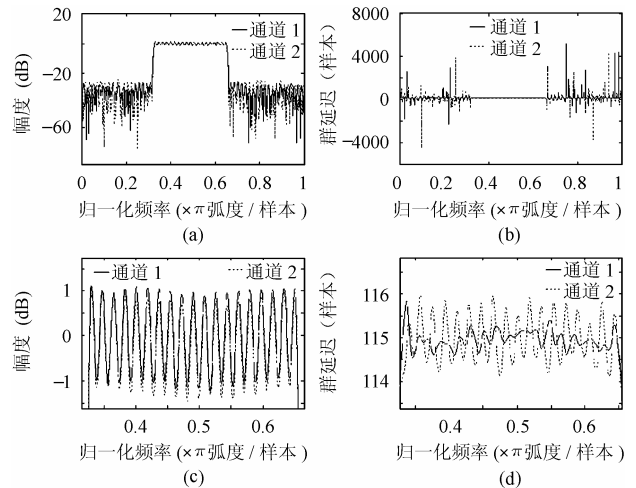


图 4 滤波器系数扰动设计举例

(a)(b) 对应通道的幅频响应和群延迟响应

(c)(d) 为通带局部放大的效果

零极点扰动模型采用 FIR 滤波器系数扰动的方式实现，首先设计参考通道的滤波器指标为通带截止频率{8MHz, 16MHz}、阻带截止频率{7.8MHz, 16.2MHz}、通带波纹 2dB、阻带衰减 30dB，然后将参考通道的滤波器系数按 5% 的比例随机扰动，得到通道 1 和通道 2 的滤波器系数。从图 4 可以看出，滤波器系数扰动与频率响应没有明确的对应关系，系数扰动后，通带幅度起伏不明显，阻带衰减不达标，通带群延迟起伏峰峰值超过 1 个采样间隔，平均群延迟偏差无法控制。

基于滤波器逼近的仿真模型采用 Chebyshev I 型滤波器逼近的方式实现，通道 1 和通道 2 的滤波器阶数分别为 5 阶

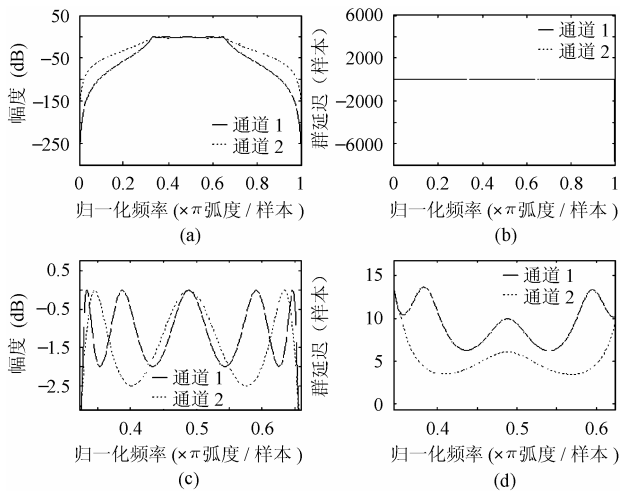


图5 Chebyshev 逼近设计举例

(a)(b)对应通道的幅频响应和群延迟响应

(c)(d)为通带局部放大的效果

和3阶,通带波纹分别为2dB和2.5dB,通带截止频率均为{8MHz, 16MHz}。从图5可以看出, Chebyshev 滤波器逼近能够部分地控制通道性能指标,其中,通带幅度起伏峰值和起伏数达到指标要求,阻带衰减不达标,通带群延迟起伏峰峰超过1个采样间隔,平均群延迟偏差无法控制。

设计结果表明,试图利用零极点扰动模型或基于滤波器逼近的仿真模型设计满足性能指标的通道是困难的,虽然经过大量尝试后有可能保证通道满足性能指标,但是这样做随机性较大而且耗时较多;而基于滤波器级联描述的仿真模型设计准确、可控性强,适用于自适应阵列通道失配的仿真。

4 结束语

在工程应用中,自适应阵列的各阵元通道需要满足特定的性能指标要求。因此,在建立通道失配的仿真模型时,不仅应该描述各通道之间幅相特性的不同,还需要保证各通道都符合性能指标。本文提出的通道失配仿真模型将通道滤波器的性能指标加以划分,由各个子滤波器分别完成,同时各个子滤波器对指标的控制互不影响,从而实现通道失配较为精确的描述。设计举例表明,该模型具有设计准确、可控性强的特点,可方便地应用于自适应阵列通道失配的仿真。

参考文献

- [1] 龚耀寰. 自适应滤波(第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 308 - 407.
- [2] Teitelbaum K A. Flexible processor for a digital adaptive array radar [J]. *IEEE AES Magazine*, 1991, 6(5):18 - 22.
- [3] Monzigo R A, Miller T W. Introduction to Adaptive Arrays [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980: 461 - 475.
- [4] Aalfs D D, Holder E J. Impact of wideband channel-to-channel mismatch on adaptive arrays [C]. *IEEE Proc. of SAMSP*, Cambridge, 2000: 459 - 463.
- [5] Gerlach K. The effect of IF bandpass mismatch errors on adaptive cancellation [J]. *IEEE Trans. on AES*, 1990, 26(3): 455 - 468.
- [6] 张林让, 保铮, 张玉洪. 通道响应失配对 DBF 天线旁瓣电平的影响 [J]. *电子科学学刊*, 1995, 17(3):268 - 275.
- [7] Progni I F, Nicholson B W, Upton D M, Upadhyay T, Velde W V. Impacts of frequency dependent mutual coupling and channel errors on digital beam forming antenna performance [C]. *Proc. of ION*, Nashville, 1998: 275 - 283.
- [8] Parks T W, Burrus C S. Digital Filter Design [M]. New York, John Wiley & Sons, 1987: 83 - 106.
- [9] Oppenheim A V, Schaffer R W, Buck J R 著, 刘树棠, 黄建国译. 离散时间信号处理(第二版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 390 - 410.
- [10] Antoniou A, Howell R. Design of phase equalizers for recursive filters [C]. *IEEE Proc. of CCSP*, Victoria, 1993: 104 - 107.
- [11] Laakso T I, Välimäki V, Karjalainen M, Laine U K. Splitting the unit delay [J]. *IEEE SP Magazine*, 1996, 13(1): 30 - 60.

王 瑛: 男, 1981 年生, 硕士生, 从事导航通信、卫星定位系统抗干扰领域的研究工作。

王飞雪: 男, 1971 年生, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE 会员。目前从事卫星导航定位、扩频信号处理、电子系统抗干扰、全数字接收机领域的研究。已发表国内外期刊论文 20 余篇, 曾获国家科技进步二等奖 1 项, 部委级科技进步一等奖 2 项, 二等奖 1 项。