

智能天线中MMSE和MV波束形成器的仿真分析

王 畅¹, 王元钊²

(1.中国电信潮州分公司无线市话网优室, 广东潮州 521000; 2.韩山师范学院物理系, 广东潮州 521041)

摘 要: 通过对智能天线中的MMSE和MV这两种典型的波束形成器进行软件模拟和比较分析, 得出MMSE波束形成器和MV波束形成器各自的特点以及它们在智能天线应用中分别适用的场合.

关键词: 智能天线; MMSE; MV; 信干噪比; 最优化; 仿真

中图分类号: TN821+.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6883 (2005) 03-0030-07

智能天线技术是当前通信领域的研究热点之一^[1]. 无线通信系统中智能天线被用来改善无线通信系统的性能, 提高系统的容量. 智能天线对来自各个方向的波束进行空间滤波. 它通过对各天线元的激励进行调整, 优化天线阵列方向图, 将零点对准干扰方向, 大大提高阵列的输出信干噪比, 改善系统质量, 提高系统可靠性. 对于软容量的CDMA系统, 信干噪比的提高还意味着系统容量的提高^[2].

智能天线技术研究的核心是波束赋型的算法. 由于发送时参考信号是预先知道的, 对接收到的参考信号进行处理可以确定出信道响应, 再按一定准则(如著名的迫零准则)确定各加权值, 或者直接根据某一准则自适应地调整加权值, 以使输出误差尽量减小或稳定在可预知的范围内^[1]. 常用的准则有MMSE(最小均方误差)、LMS(最小均方)和RLS(递归最小二乘)等等^[3]. 本仿真要进行实验分析的MMSE和MV就是其中很重要的两种. 本文将借助Matlab采用计算机仿真模拟的方法, 人为地设定一些工作环境, 以MMSE波束形成器和传统的MV波束形成器在各种环境下的运行效果相比较, 说明MMSE和MV两种算法在波束形成器设计中各自具有的特点以及彼此适用的环境和范围. 进而指导我们在面对不同环境设计智能天线时合理地选择相应的波束形成器.

1 MMSE和MV波束形成器的原理

MMSE和MV波束形成器分别采用了MMSE技术和MV技术. MMSE(Minimum Mean Square Error)技术是针对白噪声环境设计的一种相当有效的线性技术, 它的基本思想是以最小均方误差算法(即最小化 $E[|\mathbf{W}^T \mathbf{r}(t) - \mathbf{p}(t)|^2]$)为准则. 首先定义在采样时间里天线实时接收到的信号 $\mathbf{r}(t)$ 的形式为: $\mathbf{r}(t) = \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{i=0}^{L_k-1} \sqrt{P_k} \alpha_{k,i}(t) b_k(t - \tau_{k,i}) a_k(t - \tau_{k,i}) \mathbf{V}(\theta_{k,i}) + \mathbf{n}(t)$. 式中 P_k 是天线接收到的第 k 个用户的信号功率, $\alpha_{k,i}(t)$ 是第 i 个接收路径到第 k 个用户的增益, $b_k(t)$ 为传送的数据, $\tau_{k,i}$ 是延时, $a_k(t)$ 是

收稿日期: 2004-10-12

作者简介: 王畅 (1980-), 男, 广东潮州人, 中国电信潮州分公司无线市话网优室助理工程师.

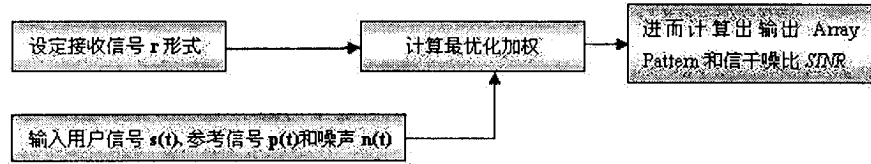
传输序列, $\mathbf{V}(\theta)$ 是数组响应向量($\mathbf{V}(\theta) = [\dots, e^{j2\pi \sin \theta}, e^{j\pi \sin \theta}, 1, e^{-j\pi \sin \theta}, e^{-j2\pi \sin \theta}, \dots]^T$), θ 为多径入射角度, $\mathbf{n}(t)$ 是白噪声.其次我们再人为地引入一个参考信号序列 $\mathbf{p}(t)$,并用这个参考序列来确定 $E[|\mathbf{W}^T \mathbf{r}(t) - \mathbf{p}(t)|^2]$ 最小情况下的 $\mathbf{W}$,进而通过波束形成器中的加权系数 $\mathbf{W}$ 的自适应调整,把接收信号的信干噪比减至最小,达到最优化波束形成器的效果.

对比MMSE算法,传统的MV(Minimum Variance)算法,即“最小变量算法”只是简单地以最小化 $E[|\mathbf{W}^T \mathbf{S}(n)|^2]$ 为原则,没有另外再引入一个设定的参考信号序列.

2 仿真思路

根据以上MMSE和MV的原理,笔者编写出相应的Matlab仿真程序,对MMSE波束形成器和MV波束形成器,在具有不同特性的输入信号情况下进行软件编程模拟,在接收信号的各个分支具有不同时延的情况下进行模拟,对选择采样点数目多少不同的情况下进行模拟,最后对仿真模型加权后的输出结果和计算出来的信干噪比 $SINR$ 进行分析,以获取上面两种波束形成器的工作特性,从而指导我们在面对相应环境设计智能天线时选择适当算法的波束形成器.

波束形成器的仿真实现具体流程如下:



3 仿真过程及结果分析

3.1 对模型进行初始化

1) 设信号的数组响应向量 $\mathbf{V}(\theta)$ 由五个元素构成,即:

$$\mathbf{V}(\theta) = [e^{j2\pi \sin \theta}, e^{j\pi \sin \theta}, 1, e^{-j\pi \sin \theta}, e^{-j2\pi \sin \theta}]^T.$$

2) 同时假设接收信号 $\mathbf{r}(t)$ 形式如下:

$$\mathbf{r}(t) = \alpha_0 x(t) \mathbf{V}(\theta_0) + \alpha_1 x(t-1) \mathbf{V}(\theta_1) + \alpha_2 x(t-2) \mathbf{V}(\theta_2) + \mathbf{n}(t), \quad (1.1)$$

式中: $x(t) = s(t) + p(t)$, $s(t)$ 是用户信号, $p(t)$ 是参考信号,它们功率相同.关于噪声项 $\mathbf{n}(t)$,假设为功率小于第一个信道用户信号功率10 db的白噪声干扰,且定义 $\theta_0 = 0^\circ, \theta_1 = 25^\circ, \theta_2 = 45^\circ$ (多径入射角度,视入射角度为0的那个分支项,就是 θ_0 项为我们有用信号的入射角度,其他两项视为多径干扰项);又设 $\alpha_0 = 0.63 + j0.47, \alpha_1 = 0.51 - j0.45, \alpha_2 = 0.44 + j0.32$.

3.2 选用相关计算公式

1) MMSE计算最优化加权的基本公式: $\mathbf{W}_{opt} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P}$, (1.2)

式中: 自相关向量 $\mathbf{R} = E[\mathbf{r}(t) \mathbf{r}(t)^T]$, 互相关向量 $\mathbf{P} = E[\mathbf{r}(t) \mathbf{p}(t)]$.

2) MV计算最优化加权的基本公式: $\mathbf{W}_{opt} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}}{\mathbf{C} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C}^H}$, (1.3)

式中 $\mathbf{C}$ 是数组响应向量 $\mathbf{V}$ 的转置.

3) Array Pattern的计算公式:

Array Pattern(无量纲),用来表征波束形成器的输出效果 $P(\theta) = |\mathbf{V}(\theta)^T \mathbf{W}|$. (1.4)

4) 单个采样点信干噪比 $SINR$ 的计算公式:

$$tsinr = \frac{|\mathbf{W}_{opt} \cdot (\alpha_0 x(t) \mathbf{V}(\theta_0))|^2}{|\mathbf{W}_{opt} \cdot (\alpha_1 x(t-1) \mathbf{V}(\theta_1) + \alpha_2 x(t-2) \mathbf{V}(\theta_2) + \mathbf{n}(t))|^2}. \quad (1.5)$$

$$\text{一组采样点的平均SINR(单位db): } SINR = 10 \log(E[tsinr]). \quad (1.6)$$

3.3 编程实现

3.3.1 求MMSE波束形成器的最优化加权的编程实现

```
for t=1:400
    Pndb=10*log10(Pn);
    n(:,t)=wgn(5,1,Pndb); %用wgn函数生成白噪声
    r1(:,t)=a0*x(1,t+2)*V0; r2(:,t)=a1*x(1,t+1)*V1+a2*x(1,t)*V2+n(:,t); %计算标准信道和干扰信道
    r(:,t)=r1(:,t)+r2(:,t); RR(:,t)=conj(r(:,t))*r(:,t)'; PP(:,t)=conj(r(:,t))*p(1,t+2);
end
R=mean(RR,3); P=mean(PP,3); Wopt=R\P; %算最优化加权W
theta=(-pi/2:pi/180:pi/2);
for t=1:181
    deg=(-pi/2)+(t-1)*pi/180;
    V=[exp((2*pi*sin(deg))*i); exp((1*pi*sin(deg))*i); 1; exp((-1*pi*sin(deg))*i); exp((-2*pi*sin(deg))*i)];
    v1(1,t)=abs(V.*Wopt); %v1为我们要求的array pattern
end
figure(1); %作图
plot((theta*180)/pi, v1); %draw the curve of MMSE, here the unit of MMSE is degree!
Wopt %show the Wopt of MMSE
```

3.3.2 求MV波束形成器的最优化加权的编程实现

```
V0=[1;1;1;1;1];
for t=1:181
    deg=(-pi/2)+(t-1)*pi/180;
    V=[exp((2*pi*sin(deg))*i); exp((1*pi*sin(deg))*i); 1; exp((-1*pi*sin(deg))*i); exp((-2*pi*sin(deg))*i)];
    C=V0'; MVBW=(inv(R)*C')/(C*inv(R)*C'); %compute the Wopt
    v2(1,t)=abs(V.*MVBW);
end
figure(2); %draw a pic for the situation of MVB
plot((theta*180)/pi, v2);
```

3.3.3 求信噪比SINR的编程实现

```
for t=1:400
    Pndb=10*log10(Pn);
    n(:,t)=wgn(5,1,Pndb); %用wgn函数生成白噪声
    r1(:,t)=a0*x(1,t+2)*V0; r2(:,t)=a1*x(1,t+1)*V1+a2*x(1,t)*V2+n(:,t); %计算标准信道和干扰信道
    r(:,t)=r1(:,t)+r2(:,t);
    tsinr(1,t)=((abs(Wopt.*r1(:,t))).^2)/((abs(Wopt.*r2(:,t))).^2); %SINR for each sample
end %这个程序是求MMSE的SINR, 把其中的Wopt改成MVBW就是求MV的SINR了
SINR=10*log10(mean(tsinr)) %Average SINR
```

3.4 仿真分析

3.4.1 按照初始化条件的仿真分析

3.4.1.1 抑制干扰效果图的仿真分析

我们取400个采样点, 根据条件(1.1)以及公式(1.2)和(1.3), 由仿真程序计算最优加权值 $\mathbf{W}_{opt}$, 从 -90° 到 $+90^\circ$ 调整入射角度 θ , 由之可以得到对应的Pattern曲线, 即 $P(\theta) - \theta$ 曲线。

把用户信号 $s(t)$ 和MMSE的参考信号 $p(t)$ 都设置为随机产生的信号. 关于噪声项, 同样设置成随机序列, 并按照前面假设设置为功率小于第一个信道用户信号功率10 db的白噪声干扰.

分成输入信号均值为0和不为0两种情况进行仿真, 得到如下曲线:

输入信号均值为0的仿真情况, 如图1.1所示.

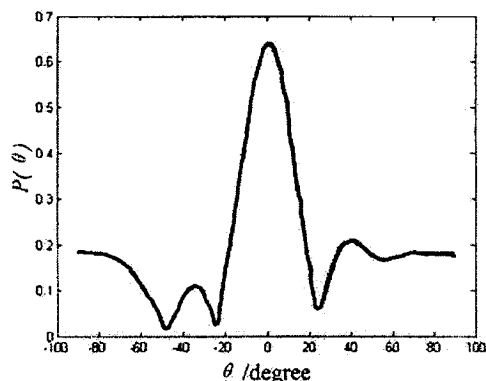


图 1.1 (a) MMSE 情况

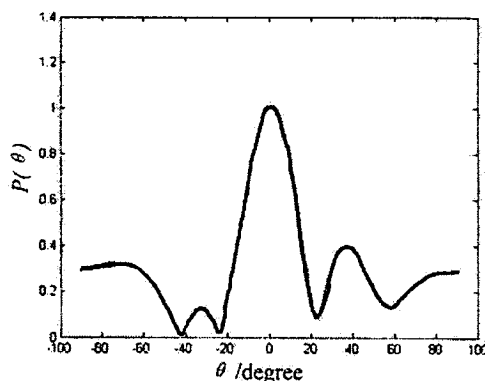


图 1.1 (b) MV 情况

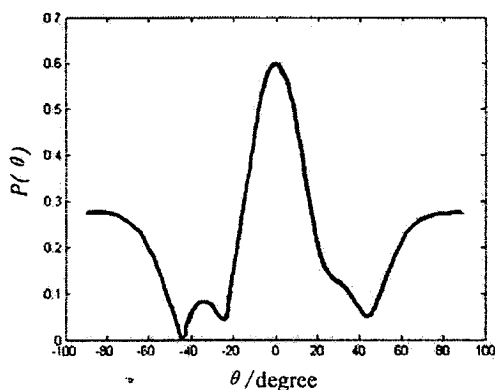


图 1.2 (a) MMSE 仿真

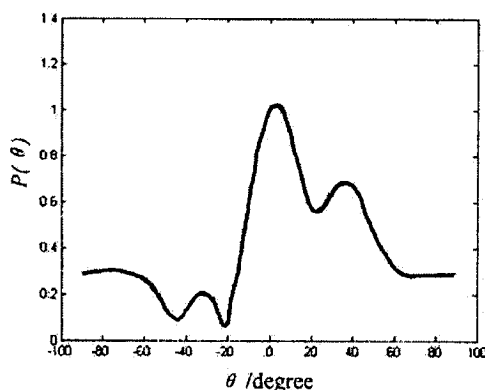


图 1.2 (b) MV 仿真

由图1.1可见, MMSE曲线的最高峰值在0度, 极值的旁边只剩下两个小得多的峰; 0度以外其它角度的信号增益(被我们视为干扰项的)被很好的抑制掉了(特别是-25度和-45度附近甚至出现了谷点, 而对称的x轴另外一边附近也同样出现了波谷, 这些角度附近干扰信号受到特别抑制).和理论上预测的结果差不多, MV算法在这种情况下的图形和MMSE的图形很相似, 呈现了同样的特点. 可见MV波束形成器在输入信号均值为0的时候消除多径干扰也有比较理想的效果.

输入信号均值不为0的仿真情况, 如图1.2所示.

从图1.2可以看到, MMSE仍保持了很好的抑制干扰的特性, 在0度有用信号方向上的主峰相对其他方向的干扰依然占据着绝对优势; 而MV的Pattern图虽然同样是在角度为零时取得极值, 在其他角度受到一定抑制, 但对比同样环境下的MMSE, MV消除干扰的效果就远不如MMSE了(表示干扰的旁瓣相对来说看起来还很高, 在0度的主峰看不出有绝对的优势).

3.4.1.2 信噪比SINR的仿真分析

a) 当输入信号均值为0的时候, 两种算法的SINR值都大约在20~30 db, 差别不大.

b) 当输入信号均值不为0的时候, MMSE的SINR仍大约在20~30 db, 同样情况下MV的SINR的值只有0 db到5 db之间且很小. 这也说明了在输入信号序列均值不为0的时候, MMSE消除多径干扰的能力比MV好得多.

3.4.2 改变MMSE接收信号中干扰项部分时延的仿真分析

下面改变式(1.1)中MMSE接收信号干扰项(后两项)的时延, 采用形式如下式(2.1)或下式(3.1)的接收信号 $\mathbf{r}(t)$: $\mathbf{r}(t) = \alpha_0 x(t)\mathbf{V}(\theta_0) + \alpha_1 x(t)\mathbf{V}(\theta_1) + \alpha_2 x(t-2)\mathbf{V}(\theta_2) + \mathbf{n}(t)$, (2.1)

$$\mathbf{r}(t) = \alpha_0 x(t)\mathbf{V}(\theta_0) + \alpha_1 x(t-2)\mathbf{V}(\theta_1) + \alpha_2 x(t-2)\mathbf{V}(\theta_2) + \mathbf{n}(t). \quad (3.1)$$

并对三种情况进行仿真对比, 分别得到下面三条曲线:

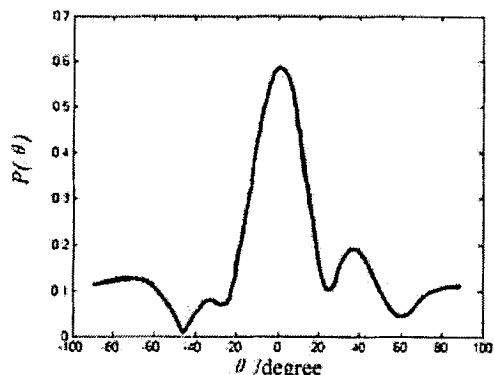


图 2.1 接收信号为式 (1.1) 的仿真

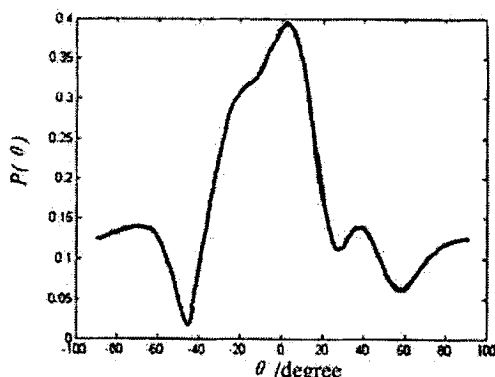


图 2.2 接收信号为式 (2.1) 的仿真

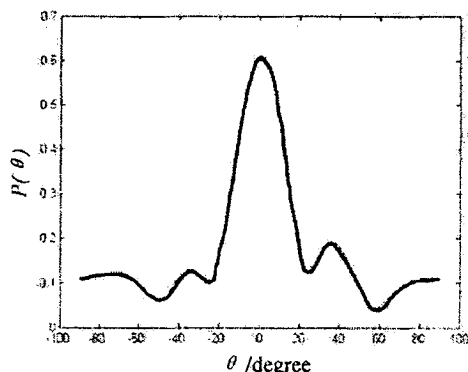


图 2.3 接收信号为式 (3.1) 的仿真

图2.1和图2.3对应于两个干扰分支都有时延情况, 仿真结果的这两个图形大体上差不多. 图2.2对应于其中一个干扰项没有时延情况, 可以看到图2.3其中在0度处最高峰和附近的一个波峰混叠在一起.

3.4.3 改变采样点数目的仿真分析

以上我们的仿真都是取400个采样点进行的, 那么采样点的数目多少对我们的MMSE以及MV波束形成器的工作效果有什么影响? 我们取20, 210, 400, 1000, 2000五种情况, 通过仿真加以对比分析(其中一些典型情况的仿真作图结果可

见图3). 20个采样点时, $P(\theta)$ 曲线杂乱无章, 无法显示出规律; 多次运行仿真操作求 $SINR$ 得到的结果波动也很大; 210个采样点时, $P(\theta)$ 曲线开始显示出规律, $SINR$ 也初步稳定下来; 400个采样点时, $P(\theta)$ 曲线和 $SINR$ 值都更加稳定, 可看出一定的规律; 1000个采样点时, $P(\theta)$ 曲线和 $SINR$ 进一步稳定; 2000个采样点时, $P(\theta)$ 曲线和 $SINR$ 都很稳定, 同1000个采样点时的情况已基本看不出差别.

从以上改变采样点数目的仿真结果可以看到: MMSE和MV的效果都和输入信号采样点的数量有关. 采样点越多, $P(\theta)$ 曲线和 $SINR$ 值就越稳定, 消除干扰的效果也越好; 反过来, 当采样点很少时, MMSE和MV都没有什么效果, 采样点需要达到一定的数目, MMSE和MV的消除干扰的优越性才能体现出来. 然而采样点也不是越多越好, 从我们的模拟仿真过程中我们也能感受到, 采样点过多, 会在一定程度上减慢波束形成器的运算处理速度. 所以在实际应用中, 应视具体情况和需求选择合适的采样点数目.

4 结论

综上所述, MMSE波束形成器在以白噪声干扰为主的环境下, 有相当好的抑制干扰的效果, 是良好的自适应波束形成器; MV波束形成器虽然也有一定的抗干扰的效果, 但只在输入信号均值为零的情况下才有一定效果, 当输入信号均值不为零时, 抗干扰效果就不佳, 而MMSE波束形成器不受这方

面的影响，仍然能够保证有很好的抵御干扰的能力；MMSE会受干扰项时延影响，当MMSE接收到的信号干扰项中有一项或者若干项没有时延的时候，处理的效果会有峰值混叠乃至多峰，影响消干效果，

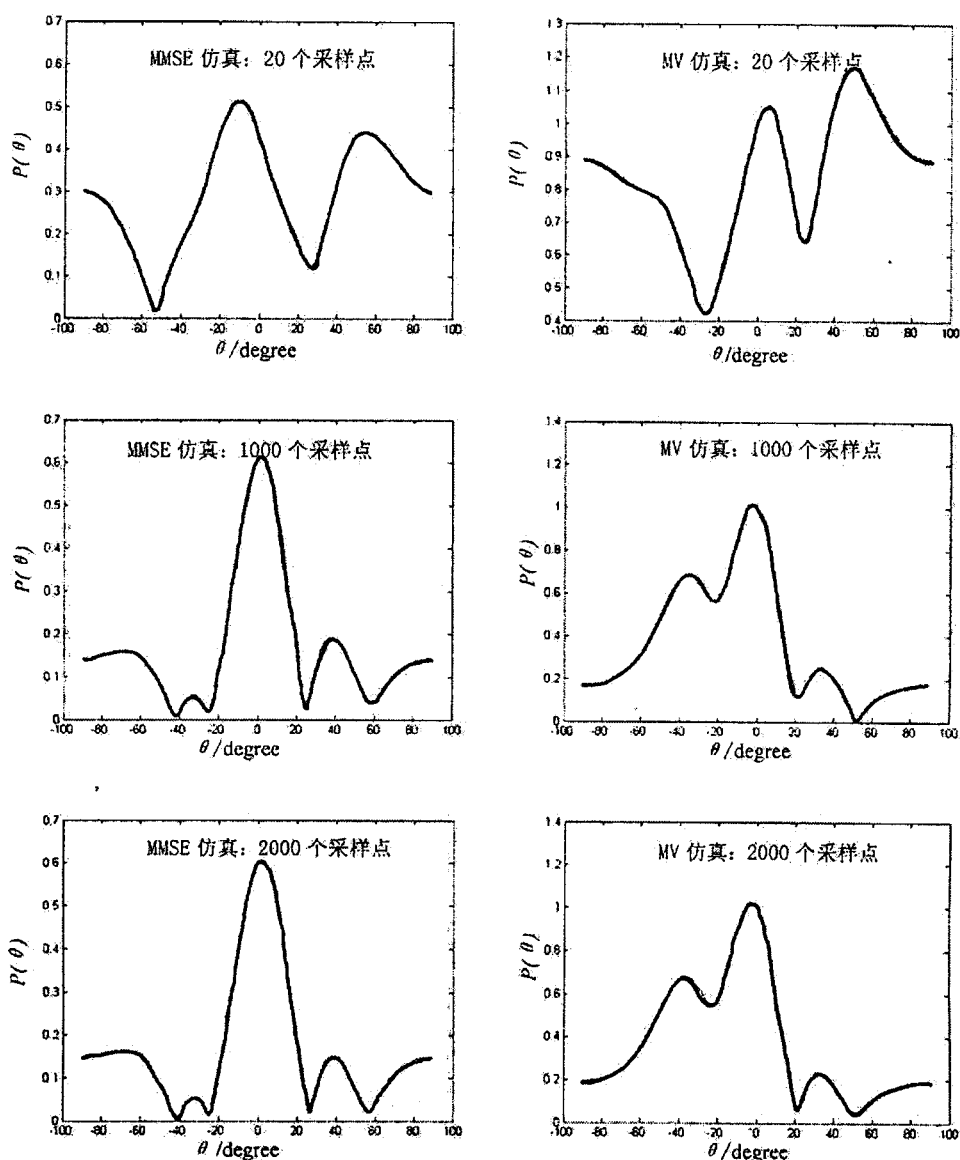


图3 当采样点数目为20、1000和2000个小时的MMSE和MV两种波束形成器工作效果

这一点在使用MMSE波束形成器的时候要注意。最后，关于采样点数目影响的分析，采样序列和参考信号序列越长，经过MMSE和MV波束形成器处理后的效果越好，但当采样点的数目达到了一定数量，即使我们再继续增加采样点，效果也不会明显提高了。故在可能的情况下，应按照需要设置足够多的采样点，但也不必太多，以致于影响波束形成器的处理速度。由此，我们得出MMSE波束形成器自身的特点以及在应用的时候应该注意的地方。

致谢 本文中的一些重要公式参考了中山大学电子系周渊平教授的英文版研究生讲义，本文的写作也得到过周教授的指导，笔者在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 桑怀胜, 李峥嵘. 智能天线的原理、自适应波束形成算法的研究进展与应用[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(6): 83~89.

- [2] 李世鹏. 智能天线的原理和实现[J]. 技术论坛, 2001, 4(8):12~19.
[3] 杜智敏, 薛强, 吴伟陵. 智能天线技术简介[J]. 移动通信. 2000, 2(3): 38~40.

Simulation of MMSE and MV Beamformer in Smart Antennas

WANG Chang¹, WANG Yuan-zhao²

- (1. PHS Center, China Telecom Chaozhou Branch, Chaozhou 521000, China
2. Physics Department, Hangshan Teachers College, Chaozhou 521041, China)

Abstract: By programming to simulate and compare the MMSE Beamformer and MV Beamformer in Smart Antennas, this article shows the characteristics of these two kinds of Beamformers and suggests the proper application situations of them in smart antennas.

Key words: smart antenna; MMSE; MV; SINR; optimality; simulation

(上接第29页)

The Development Trends of DC Power Supply Technique

ZHENG Yao-tian

(Physics Department, Hangshan Teachers College, Chaozhou 521041, China)

Abstract: This paper discusses the characteristics of linear power supply and switching power supply in DC power supply technique. Then the development trend of power supply technique is pointed out as switching power supply.

Key words: power supply technique; switching power supply; linear power supply

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>