

# 频率扩展对智能天线算法性能的影响

谭萍 漆兰芬

(华中科技大学电子与信息工程系, 武汉, 430074)

**摘要:** 智能天线各种自适应算法性能受应用环境的影响非常大。本文首先利用阵列协方差矩阵特征值分布的特点从理论上分析了频率扩展对算法性能的影响。最后以 MMSE 算法为例, 通过模拟仿真验证了频率扩展对智能天线自适应算法性能的影响。

**关键词:** 智能天线, 自适应算法, 频率扩展, 矩阵特征值分布

## 一、引言

随着移动通信技术的发展, 智能天线技术的研究引起了广泛关注, 目前已经涌现出多种自适应波束形成算法。但是移动通信环境非常复杂, 存在其他用户的干扰, 也有多径传播引起的信号空间和时延扩展, 以及用户移动引起的多普勒频率扩展等<sup>[1]</sup>, 算法性能受应用环境的影响非常大。因此有必要研究不同环境因素对各种自适应算法性能影响, 从而针对不同的环境选择合适的算法<sup>[2]</sup>。文献[3,4]中对干扰及时延扩展的影响进行了讨论, 本文将分析和讨论频率扩展对智能天线自适应算法性能的影响。

## 二、不同频率扩展对阵列空间谱矩阵特征值分布的影响

阵列协方差矩阵特征值是复杂环境中多个信道参数的函数, 这些信道参数包括信号相关性、信号到达角度、信号功率等<sup>[4]</sup>。频率扩展也将影响到矩阵特征值的分布。

假设天线阵列为阵元间距为半波长的 M 元均匀直线阵, 若有一个功率为  $\sigma_s^2$  的单频信号从一个确定的方向  $\theta$  入射, 则第 m 个阵元上的阵列响应为:

$$[V(\theta)]_m = \exp\{j2\pi[m - (M-1)]d \sin(\theta)f/c\}, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

如果信号频率存在扩展, 假设功率在频率上的分布函数为  $p(f)$ , 则相应的信号空间谱矩阵  $S_x$  为:

$$[S_x]_{n,m} = \int_{-\infty}^{\infty} p(f) \cdot \exp[j \cdot 2\pi \cdot \tau_{nm} \cdot f] df, \quad \text{其中 } \tau_{nm} = (n-m)\sin(\theta)/(2f_c)$$

假设信号的功率频谱在  $[f_c - \Delta f, f_c + \Delta f]$  范围内均匀分布，则

$$[S_x]_{n,m} = \sigma_s^2 \exp(j\pi(n-m)\sin(\theta)) \sin c[\pi(n-m)\sin(\theta)(\Delta f / f_c)]$$

根据上式可知，当信号入射角度  $\theta_0=0^\circ$  时， $[S_x]_{n,m}=\sigma_s^2$ ，与频率扩展  $\Delta f$  无关。特征分解后，只有一个非零特征值。因此这种特殊情况下，对利用  $S_x$  统计特性的算法而言，其算法性能不受影响。而当  $\theta_0 \neq 0^\circ$  时， $S_x$  特征分解后得到的特征值不仅与频率扩展  $\Delta f/f_c$  有关，而且和信号的入射角度  $\theta_0$  有关。

以一个阵元间距为半波长的  $M=8$  元均匀直线阵为例， $\theta_0=1^\circ$  和  $\theta_0=10^\circ$  时，不同频率扩展  $\Delta f/f_c$  对应的一组归一化特征值  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M$  的变化曲线如图 1 和图 2 所示。

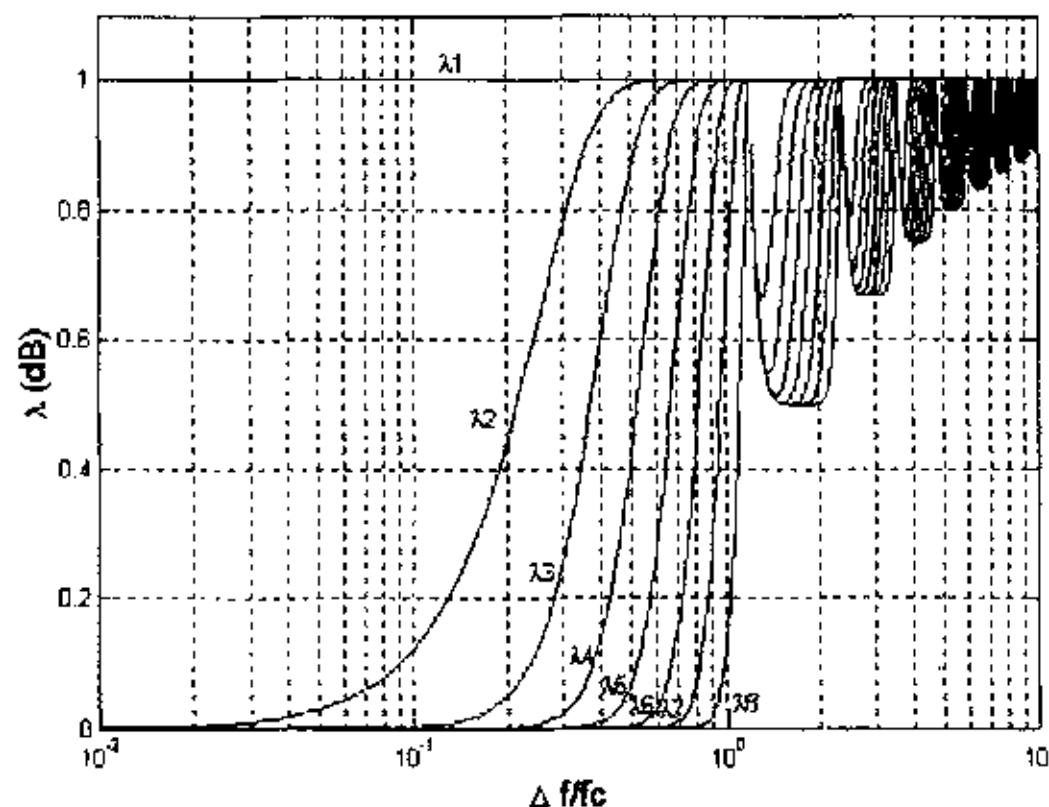


图 1  $\theta_0=1^\circ$  时不同  $\Delta f/f_c$  下矩阵特征值分布

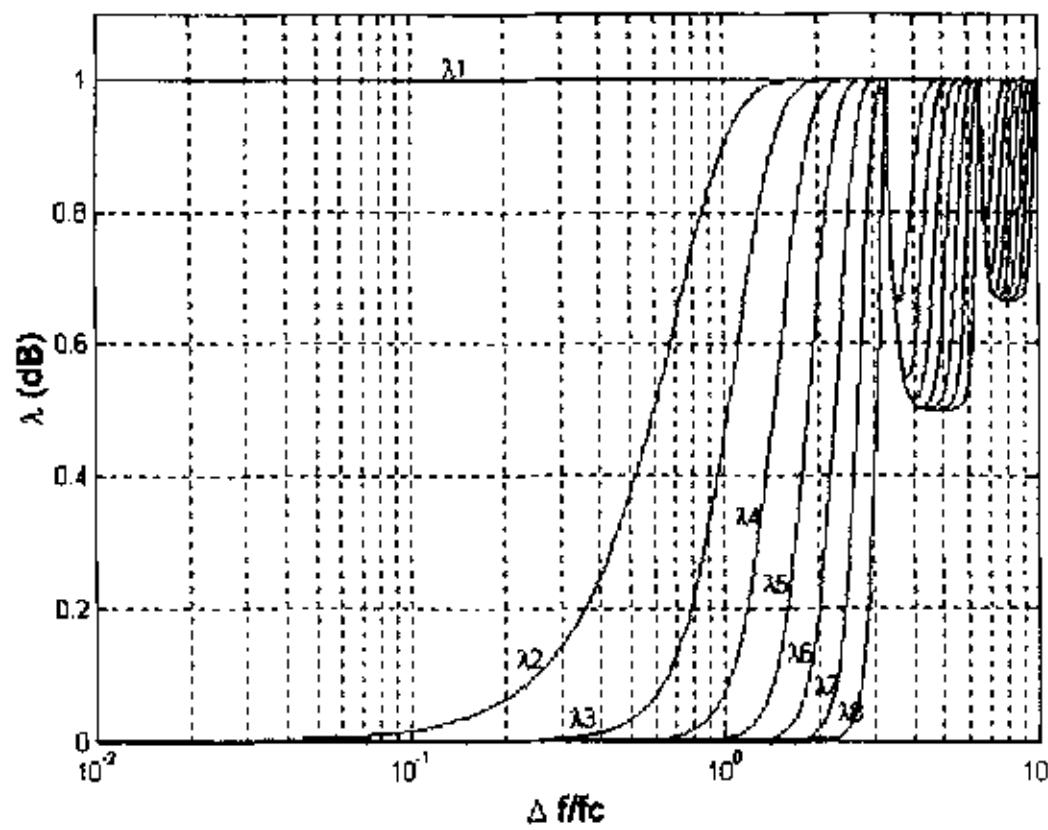


图 2  $\theta_0=60^\circ$  时不同  $\Delta f/f_c$  下特征值分布

根据图 1 和图 2 中特征值的变化趋势可知，频率扩展  $\Delta f$  较小时，信号近似为一个单一频率的信号，只有一个显著大的特征值；随着  $\Delta f$  增加，频率扩展的信号表现

为一个宽带信号，出现多个大特征值，进一步扩展会得到一个频域上的白噪声信号。这使得针对窄带信号设计的自适应方法都不再有效。特别是基于 DOA 估计的算法，需要根据已知的阵列流形计算最佳权值，但是频率扩展会使得实际所得的阵列流形与根据单频信号计算得到的阵列流形有误差，导致系统接收性能变差。

比较图 1 与图 2 可知，特征值随频率扩展  $\Delta f$  变化的快慢与入射角度有关。对于同样的频率扩展  $\Delta f$ ，入射角度大时，特征值的扩展要大，与单频信号  $S_x$  只有一个大特征值的情形更接近，因此对算法的影响要小。

### 三、频率扩展对 MMSE 算法性能影响的模拟仿真

以 MMSE 算法为例，阵列为 8 元均匀直线阵，期望信号入射方向  $\theta_0=30^\circ$  时，SNR =30dB，快拍数  $N=100$ ，取不同频率扩展  $\Delta f$ ，得到相应的波束方向图如图 3 所示。当  $\Delta f=0.1f_c$ ，对应频率扩展较小的情形，形成一个指向期望信号的窄波束，与  $\Delta f=0$ （没有频率扩展）的波束方向图近似；当  $\Delta f=0.5f_c$  时，对应频率扩展较大的情形，形成一个由多个波束组成的宽波束；当  $\Delta f=10f_c$  时，信号相当于一个频率白噪声，形成一个很宽的波束，使得算法性能恶化。

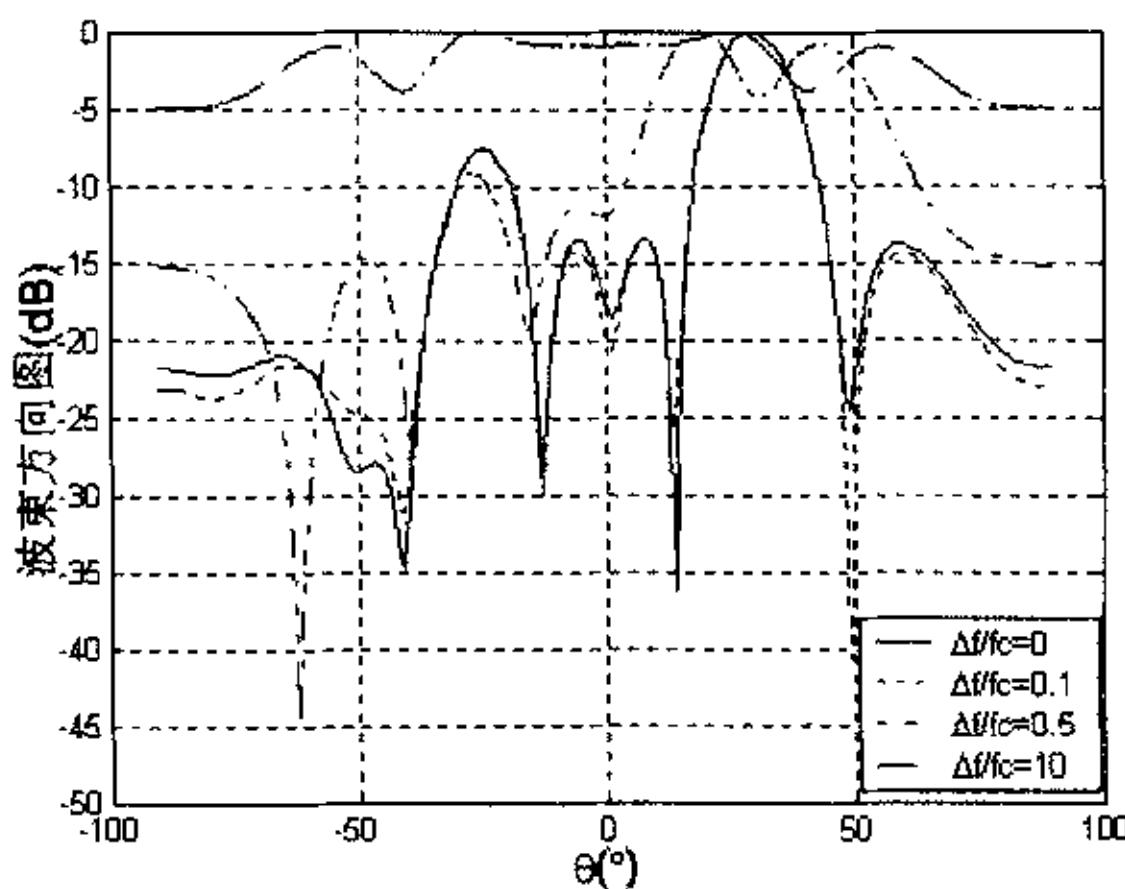


图 3  $\theta_0=30^\circ$  时， $\Delta f/f_c=0$ 、 $0.1$ 、 $0.5$  和  $10$  时，MMSE 算法所得方向图

但是，如果期望信号入射方向  $\theta_0=10^\circ$ ，同样取  $\Delta f=0.5f_c$  时，得到的波束图如图 3 所示，与  $\theta_0=30^\circ$  的情形相比，频率扩展对  $\theta_0=10^\circ$  的入射信号影响小，仍能够形成一个较窄的波束指向期望信号方向，而对于  $\theta_0=30^\circ$  的入射信号影响大，只能形成

个较宽的波束指向期望信号方向。

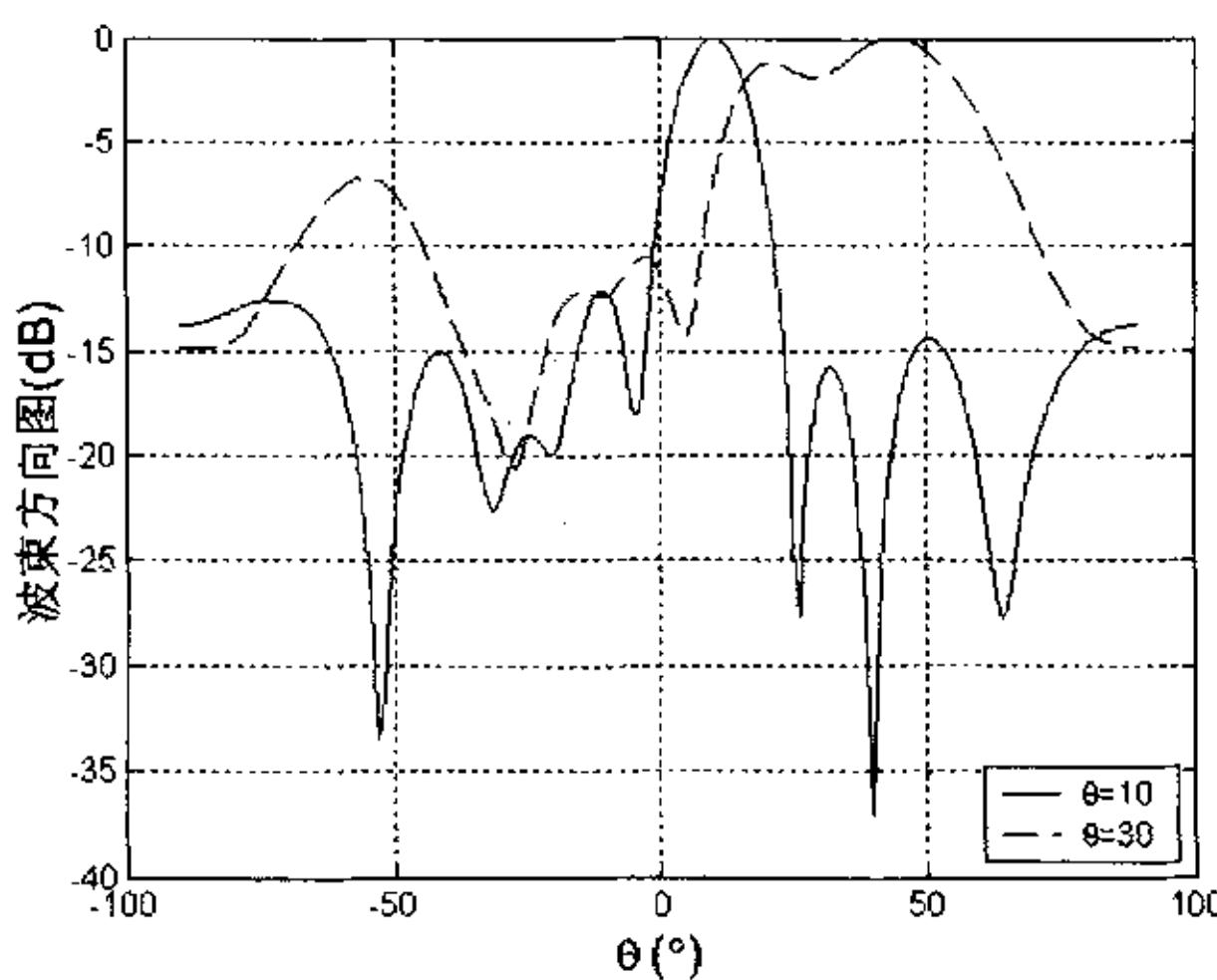


图 3  $\Delta f = 0.5f_c$ ,  $\theta_0 = 10^\circ$  和  $30^\circ$  时, MMSE 算法所得方向图

#### 四、结论

通过对空间谱矩阵特征值分布的理论分析可知, 随着频率扩展的程度增加, 频率扩展的信号表现为一个宽带信号, 出现多个大特征值, 这使得那些针对窄带信号设计的自适应方法都不再有效, 特别是基于 DOA 估计的算法。而且, 当入射角度较大时, 同样的频率扩展对算法的影响要小。具体以 MMSE 算法为例模拟仿真的结果验证了理论分析的结论。

#### 参考文献

- [1] W. C. Y. Lee. 移动通信工程理论和应用. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [2] Tan Ping, Qi Lanfen. "Identification of Radio Environments in Software Antenna for High-Speed Millimeter Wave Wireless Communication Systems", Inter. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 24(6): 899-908.
- [3] 谭萍、漆兰芬, “软件天线中不同环境的特征值分布”, 华中科技大学学报, 2004, 32(2): 1-3
- [4] A. S. Dakdouki, M. Tabulo. On the eigenvalue distribution of smart-antenna arrays in wireless communication systems. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2004, 46(4):158-167

## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、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](http://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>