

一种智能天线通道失配的校正技术

吴莉莉, 廖桂生, 张林让

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 通道之间幅相特性的不一致性(通道失配)严重影响着智能天线的性能,而通道均衡器是补偿通道失配的一种方法.如果不剔除因均衡而注入的信号,则它将严重影响用户的检测性能.本文在现有方法的基础上提出了一种新的校正方法,该方法利用自适应干扰抑制的原理抑制了注入信号,从而检测性能大大提高.最后,基于仿真实验的结果,讨论了均衡器及干扰抑制的性能与一些主要参数的关系.

关键词: 智能天线; 自适应均衡器; 自适应干扰抑制; 校正

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1845-03

A Calibration Algorithm for Smart Antenna with Receiver Channel Mismatch

WU Li-li, LIAO Gui-sheng, ZHANG Lin-rang

(Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The performance of a smart antenna system is deteriorated markedly by the mismatch among antenna element channels. To combat this, an equalizer is usually used, but the detection of useful signals for active users is degraded since the additional signal is required in equalization. A new calibration method is proposed in this paper, which can mitigate the additional signal. Simulation results are presented to demonstrate its effectiveness, and the relationship between the performance and some key parameters is also discussed.

Key words: smart antenna; adaptive equalizer; adaptive interference suppression; calibration

1 引言

在第三代(3G)移动通信中,智能天线发挥着重要作用,它利用先进的信号处理技术抑制共信道干扰(ICI)达到提高系统容量的目的.而阵列信号处理技术则是其中的一项关键技术.阵列处理中的通道主要包括高频放大器、混频器、中频放大器、相干检波器及 A/D 等模拟器件.由于模拟器件及其构成电路不可避免地存在特性上的差异,因此多个阵列处理通道之间必然存在着随频率变化的幅度、相位不一致,即所指的通道失配.已有分析表明^[1],天线旁瓣相消、数字波束形成等阵列处理技术的性能往往受制于通道间的失配度.随着智能天线实现技术研究的进展,迫切需要一种在通信环境下能够有效工作的智能天线通道失配的校正技术.

文献[2]给出的方法虽然可以校正所有的阵列误差,但是需要放置外场辐射源.我们知道,多径传播是移动通信信道的一个基本特征,所以利用外场源做校正必须要考虑多径的影响.文献[3]给出了存在多径时的阵列校正方法.可是它的计算量大,而且要旋转阵列.因为模拟电路特性随环境(如温度)、器件老化而变化,所以要周期性地校正通道失配,这样,文献[3]的方法较难应用于工程实践中.文献[4]提出了一种盲校正方法,它的优点是仅利用阵列接收的信号,就能自适应地跟踪通道幅相误差的变化并予以校正,运算量也很小.还有

一种盲校正方法,它先估计出空时信道响应,再估计校正向量^[5].基于注入信号的方法能够校正幅相误差以及天线互耦引起的误差^[6].可是这些方法都仅仅研究了通道之间的与频率无关的恒定的幅相误差的校正问题.而实际中,尤其是宽带 CDMA 信号,天线通道误差是频率的函数.即通道响应误差补偿更为迫切.文献[6]指出幅相误差对系统性能的影响比阵元间互耦效应的影响更严重.本文研究天线通道频率响应失配的校正问题.利用 FIR 滤波器能够得到可自适应调节的幅频、相频特性.在接收通道中插入附加的 FIR 滤波器,自适应地调节滤波器参数,可以补偿通道间的失配,使各个通道的响应与参考通道一致.这就是一种基于“均衡”思想的通道失配校正方法^[7].这种方法需要在接收通道前端注入信号,但是如果抑制注入信号,它将会对正常通信构成干扰.因此,如何让校正与用户信息检测互不影响,正是本文的研究任务.

2 一种智能天线通道失配的校正方法

原理如图 1. 在每个通道输入端都注入相同的信号 s , 它实际上是一个 CDMA 信号,在可利用的扩频码中,系统分配给它一个扩频序列,以与用户信号区分.设 x_i 是第 i 个天线 ($i = 1, 2, \dots, M$) 接收到的来自所有移动用户的信号.参考通道 $H_{ref}(j)$ 不接天线,记注入信号 s 通过它的输出是 s . 在第 i 个阵元天线通道 $H_i(j)$ 后级联一个自适应 FIR 均衡器 $G_i(j)$. \tilde{H}_i

$(j) = H_i(j) \cdot G_i(j)$ 是插入均衡器后第 i 个阵元通道的复合响应. s 通过它的输出是 s_i , 而 x_i 经过它的输出是 y_i . 调节均衡器系数, 使 $E[|s - (y_i + s_i)|^2] (i = 1, 2, \dots, M)$ 最小. 为了使 $\tilde{H}_i(j)$ 与参考通道 $H_{ref}(j)$ 一致, 必须保证注入信号 s 比 $x_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 强得多, 才可以近似地认为参考通道和待校正的通道有相同的输入信号. 在这种情况下, s 经过均衡通道的输出对用户信号的检测来说是很强的干扰, 要让校正与用户检测互不影响, 必须在进行检测信号之前把注入信号剔除. 注入信号 s 与用户信号 x_i 在时域不相关, 因此 s 与 $y_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 不相关, 而与 $s_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 强相关. 利用自适应干扰抵消的原理, 将 $s_i + y_i$ 作为期望信号, s 作为干扰抵消器的输入, 自动调节干扰抵消器权值, 使 s 经过适当加权后的输出 s' 与 $s_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 的均方误差最小.

3 通道失配模型及校正性能

首先建立通道失配模型, 然后通过计算机仿真研究该方法的性能与主要参数的关系. 这里, 我们用 $N-1$ 阶 FIR 模型来模拟通道响应, 设理想的通道响应为:

$$H_0(j) = \sum_{i=0}^{N-1} v(i) e^{-j \cdot i}$$

其中 $v(i) (i = 0, 1, \dots, N-1)$ 为模拟通道响应的 FIR 滤波器的权系数.

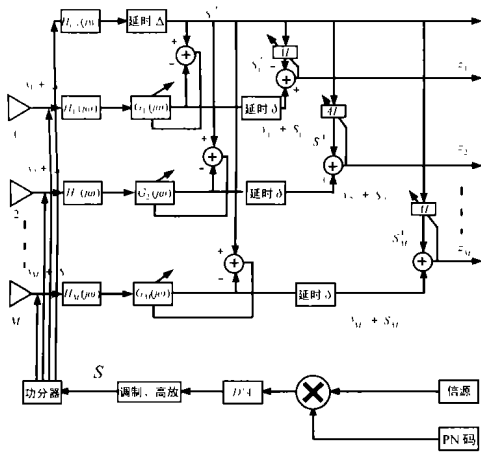


图1 校正方法原理图

以参考通道 $H_{ref}(j)$ 为基准, 第 i 个通道 $H_i(j)$ 相对于它的失配特性为:

$$D_i(j) = \frac{H_i(j)}{H_{ref}(j)} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} [v(k) + v_i(k)] e^{-j \cdot k}}{\sum_{k=0}^{N-1} [v(k) + v_0(k)] e^{-j \cdot k}}, i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式(1)中 $v_i(k), v_0(k)$ 为零均值等方差相互独立的高斯噪声, 且 $v_0(k) = 0, i = 0, 1, 2, \dots, M$

考虑一个频率响应为 $H(j)$ 的通道, 令

$$D(j) = \frac{H(j)}{H_{ref}(j)} = [1 + H(j)] e^{j \cdot \theta(j)}, i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

定义通道幅度失配
$$\overline{H} = \left[\frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} H^2(j) d\omega \right]^{1/2} \quad (4)$$

相位失配
$$\theta = \left[\frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \theta^2(j) d\omega \right]^{1/2} \quad (5)$$

在仿真实验中, 不失一般性, 只需考察一个天线通道与参考通道进行均衡的情况.

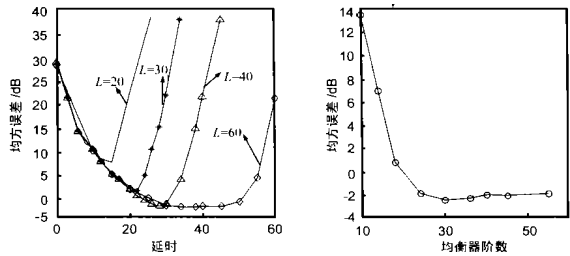


图2 均衡器性能与参考延时的关系 图3 均衡器性能与均衡器阶数的关系 (参考延时取均衡器阶数一半)

均衡器阶数 L 及延时 τ 的选择对均衡性能影响很大^[7-9]. 图2、3分别给出了均衡性能与 L 和 τ 的关系. 在本文的仿真实验中, 天线接收端收到 20 个异步移动用户的多径信号. 从图2可以看到, 最佳延时 τ 大约取均衡器长度 L 的一半附近. 从图3显然可见, 均衡器阶数 L 越大, 均衡性能越好. 这是显然的, 因为第 i 个天线通道是一个 FIR 滤波器 $H_i(j)$, 参考通道也是 FIR 滤波器 $H_{ref}(j)$, 要想在天线通道 $H_i(j)$ 后面级联一个滤波器 $G(j)$ 使得: $H_i(j) \cdot G(j) = H_{ref}(j)$, 那么 $G(j) = \frac{H_{ref}(j)}{H_i(j)}$, 它是一个 IIR 滤波器. 但是我们只能用 FIR 滤波器去逼近 IIR 滤波器, 自然 L 越大, 逼近效果越好. 可以看到, L 大于某个值以后, 均衡效果再提高已经不明显了. 实验中发现, 这个值不仅与待均衡通道滤波器阶数有关, 还与通道之间的失配程度有关. 因此需要通过实验来确定均衡器的阶数.

选取注入参考信号 s 与天线接收端的信号 x_1 功率比为 22.4079dB. 以 $H_{ref}(j) e^{-j \cdot \tau}$ 为参考通道, 图4、5给出了均衡前后的通道失配情况. 均衡前 $\overline{H} = 1.0097, \theta = 89.792^\circ$; 均衡后 $\overline{H} = 0.0387, \theta = 0.4020^\circ$.

为了确保通道校正的效果, 要求注入信号的功率与用户信号功率相比足够大. 但是这对后面的用户信号检测是不利的, 因为注入信号的功率很大, 如果不采取措施, 在后面的用户信号处理阶段, 注入信号相当于很强的干扰, 甚至使系统无法工作. 实验验证了本文所提出的方法可以有效地克服这对矛盾, 有以下定义:

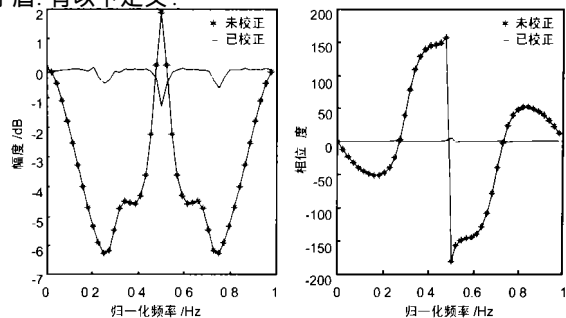


图4 均衡前后幅度失配特性 图5 均衡前后相位失配特性

$$SIR_1^i = E[y_i^2] / E[s_i^2] \tag{6}$$

$$SIR_2^i = E[y_i^2] / E[(s_i - s)^2] \tag{7}$$

$$G_i = SIR_2^i / SIR_1^i \tag{8}$$

$$SIR_3^i = E[y_i^2] / E[(s_i - s)^2] \tag{9}$$

$$G_i = SIR_3^i / SIR_1^i \tag{10}$$

式(6)是第*i*个通道的均衡器输出端的信干比,式(7)为采用干扰抵消后第*i*个通道信干比。而第*i*个通道采用干扰抵消后的改善因子由式(8)给出。未采用干扰抵消,而直接从第*i*个均衡器的输出中减去参考通道的输出得到的误差信号 $e_i = y_i + s_i - s$ 的信干比如式(9)所示。式(10)给出了第*i*个通道未采用干扰抵消的改善因子。

前面采用自适应方法调整均衡器使得接收通道与参考通道一致。但是,由于均衡器的阶数有限,所以接收通道与参考通道之间还是存在一定的差异。注入的信号 s 经过第*i*个接收通道的输出 s_i 与它经过参考通道的输出 s 也不相同,尽管两通道之间的差异很小,但是由于注入信号很强, s_i 与 s 的差异可能会很大。所以,仅依靠简单地把 s_i 与 s 相减还不能有效地抑制注入信号。利用 s 与 s_i 强相关且与用户数据不相关的性质,插入一自适应干扰抵消器,调节抵消器系数使 s 通过它的输出 s_i 与 s_i 的均方误差最

小。实验也证明了采用自适应干扰抵消,与不用干扰抵消相比,改善因子有提高。如图6所示。

最后,通过实验研究了抵消器的性能与主要参数的关系。从图7可见,在均衡器阶数取得足够大的情况下(本例中,未校正前 $H = 1.0997$, $\theta = 89.792^\circ$,校正后 $H = 0.414$, $\theta = 0.7^\circ$),自适应干扰抵消器的性能不会随其阶数的增加而取得明显改善(抵消器阶数为1时,改善因子 $G_1 = 46.2078$)。但是,均衡器的阶数太少(本例中,未校正前 $H = 1.0997$, $\theta = 89.792^\circ$,校正后 $H = 0.5434$, $\theta = 4.87^\circ$)的情况下,干扰抵消器的性能会随其阶数 L 的增加而明显提高(抵消器阶数为1时,改善因子 $G_1 = 27.8787$)。从图7、8中不难看到,无论哪种

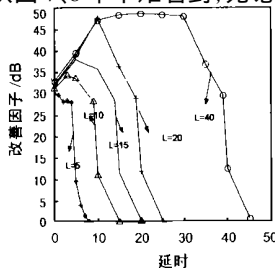
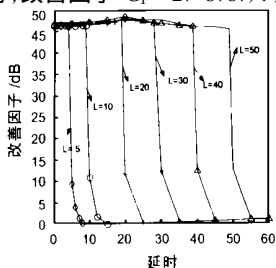


图7 均衡器阶数是40阶时抵消器性能与延时的关系 图8 均衡器阶数是10阶时抵消器性能与延时的关系

情况,抵消器的性能与延时密切相关。在本例中,最好取抵消器阶数的一半附近。本实验中 $SIR_1^i = -22.0782\text{dB}$,在参数选取适当的情况下,改善因子 G_1 可以达到 45dB ,即 $SIR_2^i = 23\text{dB}$,所以采用干扰抵消后,注入信号对用户数据的干扰已经很微弱了。

4 结论

利用自适应均衡器可以校正通道间误差。本文在此基础上提出了一种新的校正方法。该方法既可以很好地校正通道误差,又利用了自适应干扰抑制的原理抑制了注入信号,保证了校正、用户检测互不影响。并通过实验,证明了均衡器阶数 L 越高均衡效果越好,而且还与参考通道的附加延时值有关,通常最佳在 L 的一半处。在此基础上,给出了采用干扰抵消而得到的改善因子同一些重要参数的关系曲线。在通道失配得到很好的校正的情况下,抵消器的阶数可以取很低,否则,就要用足够高阶的抵消器。另外,延时的选取对抵消效果的影响很大,实验的经验表明最佳位于抵消器长度一半附近。大量实验表明本文提出的校正方法在通信环境中是有效的。

参考文献:

- [1] 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 [A]. 机载预警雷达技术交流论文集 [C],1993,4:181-188.
- [2] Fistas N,Manikas A. A new general global array calibration method [A]. Proc. ICASSP [C],1994:73-76.
- [3] Leshem A,Wax M. Array calibration in the presence of multipath [J]. IEEE Trans. Signal Processing Jan 2000,48(1):53-59.
- [4] Kobayakawa S,Tsutsui M,Tanaka Y. A blind calibration method for an adaptive array antenna in DS-CDMA systems using an MMSE algorithm [A]. Proc. of VTC '2000 [C],Spring, '01:21-25.
- [5] Lee C,Chun J. A self-calibration algorithm for an asynchronous CDMA-based antenna array. VTC '2000, Fall, '02:2441-2445.
- [6] R Dandekar K,Ling H,Xu G. Smart antenna array calibration procedure including amplitude and Phase Mismatch and Mutual Coupling Effects [A]. ICPWC '2000,293-297.
- [7] 吴涓,张玉洪,吴顺君. 用于阵列处理的自适应均衡器的研究 [A]. 雷达信号处理重点实验室学术论文选编,第2部分:机载雷达空时二维信号处理,242-249.
- [8] Paulraj A,B Papadias C. Space-time processing for wireless communications [J]. IEEE Signal Processing Magazine,Nov 1997:4-83.
- [9] 维德罗,史绅恩原著.王永德,龙宪惠译校.自适应信号处理 [M]. 四川大学出版社,1991.

作者简介:

吴莉莉 女.1976年11月出生于陕西省宝鸡市。博士生,1998年毕业于西安电子科技大学电子工程系,现在西安电子科技大学攻读博士学位。主要研究方向有智能天线技术,移动通信中信号处理技术等。
 廖桂生 男.1963年6月生于桂林市。教授,博士生导师,雷达信号处理重点实验室副主任,IEEE会员,1985年毕业于广西大学数学系,分别于1990年和1992年获西安电子科技大学计算机系和电子工程系硕士和博士学位。主要从事统计信号处理,子波变换和神经网络及其在雷达、通信中的应用研究。