

用阵列抑制 TDMA 无线通信系统中的共信道干扰

崔 炎, 吕善伟, 毛 峡

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

摘 要: 介绍了采用阵列天线抑制 TDMA 移动通信系统中的共信道干扰 (Cochannel Interference) 的方法. 采用阵列的共信道干扰抑制在空域中进行, 接收阵列自适应方向图能够直接反映出抑制干扰的性能. 应用具有闭式解的方法具体分析了抑制干扰效果; 分别利用 8 元线阵和 4 元线阵对一个实际信号图景进行仿真, 给出了方向图和阵列输出信噪比 (SINR) 的数值结果, 比较分析了不同方法的性能和影响干扰抑制效果的因素.

关键词: 自适应阵列; 共信道干扰; 最小平方准则; GSM; TDMA

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1790-04

Use Arrays in TDMA Mobile Communication for Canceling Cochannel Interferences

CUI Yan, LÜ Shan-wei, MAO Xiao

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Methods used in TDMA mobile communication to eliminate cochannel TDMA interferences is presented. since these methods use the spatial filtering, it is reasonable to use adaptive patterns to analyze the performance. Discussion about the performance of these methods is made from the view of adaptive patterns with methods which have close-form solutions. An actual signaling scenario is presented, and is followed by the simulation results such as adaptive patterns and the SINR of array output, using 8-element array and 4-element array. Factors which influence the effect of cochannel interference imination are discussed.

Key words: adaptive arrays; cochannel interference; least-squares methods; GSM; TDMA

1 引言

数字无线通信系统中的共信道干扰 (Cochannel Interference), 是限制系统性能的一个主要因素. 在基站中使用自适应阵进行空域滤波的概念早已提出, 但是关于 TDMA 无线通信系统中共信道干扰抑制的具体方法的文章并不多见.

在 TDMA 系统中消除共信道干扰 (包含多路径干扰) 面临的主要问题是 TDMA 系统中的信息传输为突发结构 (bursty), 干扰与目标数据间往往是非同步 (asynchronous) 的. 这样接收结构中的可变参数在一个时隙 (slot or burst) 中不一定始终是最优的, 有时, 在同一时隙中需要设置不同的结构参数以达到最优的干扰抑制作用.

本文首先简要介绍了抑制共信道干扰的基本思想和方法, 之后, 应用不同阵元数的阵列, 根据阵列方向图和阵列输出 SINR 分析了两种方法的性能, 和影响抑制性能的因素.

2 TDMA 突发结构 (bursty) 数据处理方法

在 TDMA 中, 信息传输采用突发结构, 一个数据帧由多个用户所复用, 每个用户只占用数据帧的一段. 根据干扰信号 (时隙) 与目标信号 (时隙) 时域中的相对位置关系, 可以将干

扰信号分成两类: 一类是覆盖了欲接收信号 (时隙) 训练序列的干扰信号 (第一类干扰), 一类 (第二类干扰) 则只覆盖了接收信号 (时隙) 的部分数据信息, 而没有覆盖其训练序列. 图 1 给出了这两类干扰的示意图, 其中信号 1 为目标信号, 信号 3 为第一类干扰, 信号 2 为第二类干扰.

基站接收阵列权值的调整采用 LS (Least Square) 准则. 之所以能够用阵列对共信道干扰进行抑



图 1 干扰类型示意图

制, 是利用了如下两个事实: 1. 在一个小区 (cell) 里, 用来传输每个 TDMA 用户数据的时隙里都包含有一个特定的训练序列 (training sequence), 不同用户所使用的训练序列间经特定处理 (如差分) 后是不相关的. 2. 共信道干扰到达基站的角度与目标信号到达的角度在绝大多数情况下是不相同的. 这样, 我们可以通过在本地区域设置与目标信号训练序列有关的参考信号, 利用天线阵列在空域中的多自由度, 对共信道干扰进行空域滤波. 我们以一个 GSM 系统中的信号图景为例, 简要说明去除干扰的过程. 图 2 中信号 1, 信号 4 和信号 7 是小区内的目

收稿日期: 2001-07-18; 修回日期: 2002-01-21
基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60072005)

标用户. 信号 2,5 分别为信号 1,4 的多路径传播. 信号 3,6 为附近小区传来的共信道干扰.

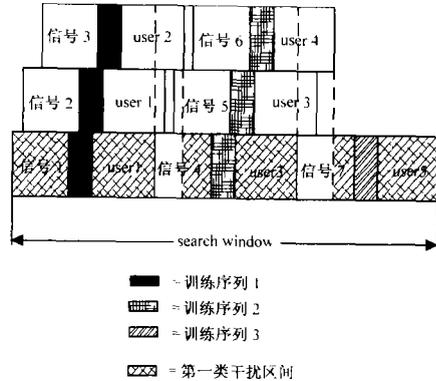


图 2 阵列接收信号时域景象

应用阵列进行共信道干扰抑制的基本过程可以归结为下面 4 个步骤:

(1) 进行帧同步识别 (Frame Synchronization), 重建接收信号时域景象

帧同步算法的目的是在当前观察窗口中确定出各用户时隙的起始时刻点, 从而恢复信号的时域图景. 它首先通过最小化下面的代价函数^[3,4], 得到阵列权值 w_i :

$$C(\bar{w}_i) = \sum_{j=0}^{N_T-1} |w_i^H x(k+j) - t_{m,i}(j)|^2 \quad (1)$$

其中 $x(k+j)$ 为阵列在时刻 $k+j$ 的接收向量, $\{t_{m,i}(j), j=1, \dots, N_T\}$ 为序号为 i 的训练序列, 它作为本地参考信号. 在算法实现时, 应该对这些训练序列进行变换后再作为参考信号, 这些变换与实际信息序列经历的变换 (如在 GSM 系统中需要完整的 GMSK 调制) 相对应. 为训练序列的长度. 我们认为此时得到的权是对应时刻 k 的“最优权”, 它能够使时刻 k 之后阵列输出的长度为 N_T 的序列与参考信号序列间的距离最小. 之后将阵列输出与训练序列进行相关运算. 这个过程对所有可能的训练序列均进行一次. 这样, 当序号为 i 的训练序列到来时 (在干扰覆盖下), 阵列将输出该训练序列的最佳估计 (最小距离准则), 因此在将这个输出与第 i 号训练序列进行相关时, 将得到一个峰值. 当我们在一个考察区间里对每个时刻的接收信号都作这样的处理, 那么在得到的若干个相关序列 (对应于不同的训练序列) 中出现峰值的时刻就代表了某个信号 (可能是目标信号, 也可能是干扰) 训练序列的起始时刻点. 当使用单一天线进行接收信号时, 使用这种方法是无效的. 因为接收信号中存在着共信道干扰, 随机的干扰迭加将破坏训练序列间的相关性质.

- (2) 划分第一类干扰区间和第二类干扰区间
- (3) 对第一类干扰进行抑制
- (4) 对第二类干扰进行抑制

之所以对两类干扰分别处理, 是由于在利用与特定训练序列相关的信号作为接收阵列参考信号时, 只能在特定区间 (比如图 2 中目标信号的阴影区间) 上消除那些在时域上覆盖了目标信号训练序列的那一类干扰. 那些没有覆盖目标信号训练序列的干扰, 由于在用参考信号对阵列进行“训练”时, 没

有使用到干扰信号的信息 (时域上没有重叠), 因此无法对其进行抑制. 对这些干扰需要进一步的处理. 可以通过最小化下面的代价函数优化阵列权值:

$$C'(w_s) = \sum_{k=L_s}^{U_s} |w_s^H x(k) - y_s(k)|^2 + \sum_{r \in R} \left(\sum_{k=L_r}^{U_r} |w_s^H x(k)|^2 \right) \quad (2)$$

式中第一个和式中的 L_s, U_s 分别表示在某一用户时隙内的第一类干扰区间 (图 2 中目标用户的阴影部分) 的下界和上界, L_r, U_r 表示第二类干扰区间的下界和上界. 在图 2 中目标用户的非阴影区为第二类干扰区间, 比如对于目标用户 4 而言, 用户 1,2 构成了第二类干扰, 此时用户 4 时段上的非阴影区间就属于第二类干扰区间. $y_s(k)$ 为在第一类干扰区间内抑制掉第一类干扰后得到的阵列输出. 代价函数 (2) 中的第一项保证了在第一类干扰区间上的最佳响应; 式中的第二项用来消除第二类干扰. 本文最优权值计算应用了文献 [2], [4] 的闭式解. 对一般的自适应阵来说, 当最优化问题没有闭式解答时, 或者目标信号与参考信号的匹配是基于统计平均的意义上时, 需要设计快速有效的迭代算法对权值进行计算, 并考虑其稳态精度和暂态性能. 本文介绍的方法中, 式 (1), (2) 均有闭式解答, 并且参考信号及其与目标信号的匹配均具有确定意义 (非统计平均意义), 最优解的表达式只与当前时隙各阵元接收信号的采样值有关. 因此, 最优权值可以直接通过闭式表达求解而无需迭代过程. 求解过程中牵涉到低维矩阵求逆运算 (矩阵维数与阵元数相同), 采用了现有的矩阵计算方法及计算模块. 下面给出的方法也同样是这种情况. 在实际实现时需要在每个阵元后设置一定的缓冲存储当前观察窗口的数据以进行处理.

上面的方法称为方法一. 文献 [2] 给出了另外一种方法. 它通过最小化式 (3) 的代价函数对两类干扰一并进行处理:

$$C''(w_s) = \sum_{k=L_s}^{U_s} |w_s^H x(k) - T_{mod,i}(k)|^2 + \sum_{r \in R} \left(\sum_{k=L_r}^{U_r} |w_s^H x(k)|^2 \right) \quad (3)$$

其中

$$T_{mod,i} = \{0 \cdots t_{mod,i}(1) t_{mod,i}(2) \cdots t_{mod,i}(N_T) \cdots 0\} \quad (4)$$

$\{t_{m,i}(j), j=1, \dots, N_T\}$ 为序号为 i 的训练序列, 式 (3) 与式 (2) 是十分类似的. 它们都是用“0”作为第二类干扰区间内的“训练序列”, 只不过在消除第二类干扰的时候所附加的约束条件不同, 式 (3) 中的第一项用 $T_{mod,i}$ 代替了式 (2) 中对目标信号的估计值 $y_s(k)$. 方法二没有对两类干扰进行分别处理, 而是在一次最优化过程中同时进行了消除, 较为简便. 与式 (1) 中的情况一样, 作为参考信号的序列需要进行相应变换.

3 仿真结果及讨论

通过一个信号环境实例仿真对前面提到的两种方法进行讨论. 信号时域图景见图 2, 参数见表 1. 信号 1,4 和 7 是同一小区内使用相邻 3 个时隙的用户直接到达基站的信号, 为感

感兴趣的信号,高斯噪声功率设为 -20dB.阵列采用均匀线阵,阵元间距 $\lambda/2$,阵元数分别为 8 和 4.

图 3 给出了帧识别算法的仿真结果,它是在搜索窗口内每一时刻应用帧识别算法得到的长为 N_T 的阵列输出序列分别与 8 个训练序列(参见 GSM 标准)进行相关运算得到的相关函数绘制在一张图上得到的.可以看到在 7 个信号(时隙)各自训练序列的起始点上准确的出现了峰值.

表 1 仿真信号环境参数

信号序号	对应用户	训练序列号	信号到达方向(度)	信号幅值	信号延迟(bit 数)
1	User1	1	30	0.8	0
2	User1	1	50	0.75	10
3	User2	1	120	0.4	30
4	User3	2	60	0.8	156
5	User3	2	75	0.65	176
6	User4	2	90	0.4	196
7	User5	3	150	0.8	312

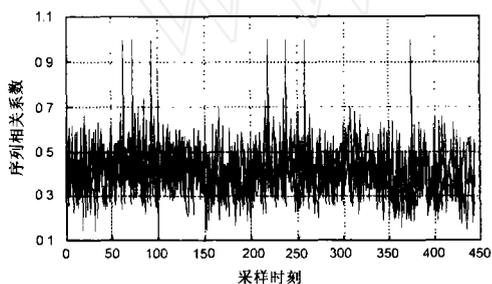


图 3 帧识别算法结果

表 2 方法一干扰抑制结果

干扰类型	目标信号	阵元数	干扰采样值数	SINR(dB)
第一类干扰	信号 1	8	/	30.58
		4	/	21.16
	信号 4	8	/	38.28
		4	/	19.41
第二类干扰	信号 4	8	30	4.69
		8	19	4.83
		4	30	-0.42

表 3 方法二干扰抑制结果

目标信号	干扰类型	阵元数	SINR(dB)
信号 4	第一类干扰	8	5.15
		4	3.23
	第二类干扰	8	6.36
		4	2.49

表 2 和表 3 分别给出了两种方法所得到的阵列输出信干噪比.图 4~6 是用方法一得到的自适应方向图.图 4 给出了信号 1 第一类干扰区间上得到的自适应方向图,从图中可以看到 8 阵元阵列在 30° 信号方向的增益为 0dB,而在 50° 和 120° 两个干扰方向上都形成了零陷.图 5 给出了信号 4 在第一类干扰区间上得到的自适应方向图,8 阵元阵列在 60° 信号方向的增益为 0dB,在 75° 和 90° 两个干扰方向上形成了较深的零陷.在图 4~6 中,同时给出了使用 4 阵元阵列的结果,可以看

到在干扰方向也形成了零陷.

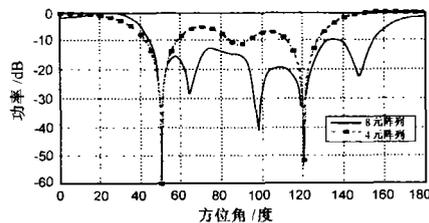


图 4 信号 1 第一类干扰区间自适应方向图

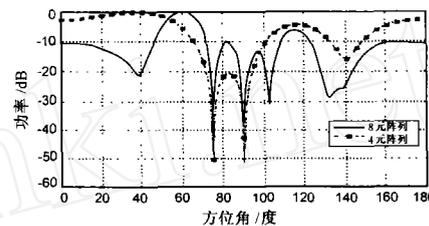


图 5 信号 4 第一类干扰区间自适应方向图

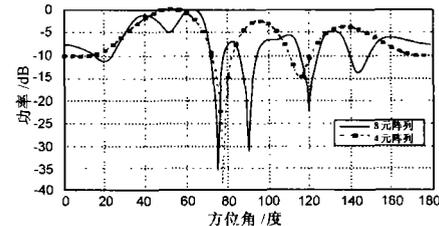


图 6 信号 4 第二类干扰区间自适应方向图

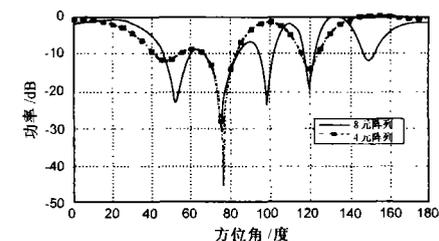


图 7 使用式(3)代表的方法得到的在信号 4 时隙内的自适应方向图

图 6 给出了采用不同阵元数时,使用式(2)得到的信号 4 区间上的对第二类干扰的抑制效果(使用了处于第二类干扰区间上的所有的采样值).8 元阵在 3 个干扰方向都形成了零陷;而 4 元阵在 50° 干扰方向上响应较差.

图 7 给出了使用方法二得到的在信号 4 时隙上的自适应方向图.信号时隙 4 上需要同时抑制信号 2,3,5 和 6,对于 8 元阵,可以看到在 90° 干扰方向没有形成零点.而对于 4 元阵,性能上要差一些.

从表 2 和表 3 可以看到,对于第一类干扰的抑制,无论是 4 元阵还是 8 元阵,方法一的性能明显优于方法二.而对第二类干扰的抑制,方法二的性能要略优于方法一.此外还可以看到,4 元阵的性能普遍要比 8 元阵差.由此我们可以推断,当干扰数目相对阵列阵元数较多时,干扰抑制性能要下降.即此时方法的有效性会受到阵列自由度的限制.但在实际蜂窝通信中,尽管小区内用户很多,但真正构成共信道干扰的用户的

数目并不是很大.这是因为 GSM 系统是 FDD 和 TDMA 的结合,尽管典型的 GSM 系统在一个小区内可支持多达几百名用户,但根据 GSM 标准,在该小区内共用相同频率资源的只有 8 位用户,而且实际上这 8 位用户并不是总是同时通话.这样,考虑通话用户的多径传播,即使加上邻近小区内比较强的共信道干扰信号,对小区内的某一特定信道来讲,有效的干扰信号数是有限的.当干扰数目多于阵元数目时,可考虑采用文献 [3] 中给出的时空联合处理的方法,这种方法可以对多于阵列自由度的干扰进行抑制.但是该方法需要对每个信号源与阵列中每个阵元间的信道进行估计,当干扰源数目较多时,这种方法需要估计的信道数增多,会带来较大的误差,并且实现相对复杂.

表 2 还给出了在消除信号 4 的第二类干扰时,采用较少的干扰信号采样值时的 SINR.可以看到此时阵列输出的 SINR 要稍好一些.从式(2)我们可以看到,当第二类干扰采样值增多时,会对代价函数施加更多的影响,此时得到的方向图与抑制第一类干扰时得到的方向图差别越大.作者通过计算发现,随着信号时域图景的不同,第二类干扰采样值数目的增多并不意味着其干扰抑制性能的提高,如表 2 中给出的例子(对本文所举例子,当采样值数目进一步减小时,SINR 会进一步提高).因此,在实际实现系统时可考虑采用较少的干扰采样值,以较少计算量及硬件的复杂度.

4 结论

本文通过接收阵列的自适应方向图,对两种抑制 TDMA 无线通信系统中共信道干扰的方法的性能进行了分析,归纳出了阵列自由度与干扰信息长度对抑制干扰效果的影响.从仿真结果来看,当阵列自由度小于或接近干扰数目时,干扰抑制性能变差;在抑制第二类干扰时,使用干扰信息的长度并不与干扰抑制效果成正比.

参考文献:

- [1] T S Rappaport. Wireless Communications: Principles and Practice[M]. Prentice-Hall, Inc. Englewood cliffs. 996: 500 - 515.

- [2] J Leary, R P Gooch. Adaptive beamforming for TDMA signals[A]. in Proc. Twenty-Ninth Asilomar Conf. on Signals, Syst and Comput. [C]. California Pacific Grove, 1995: 1378 - 1382.
- [3] A V Keerthi, J J Shynk. Separation of cochannel signals in TDMA mobile radio[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1998, 46(10): 2684 - 2697.
- [4] Y K Lee, R Chandrasekaran, J J Shynk. Separation of cochannel GSM signals using an adaptive array[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1999, 47(7): 1977 - 1987.

作者简介:



崔 炎 男, 1977 年 3 月生于辽宁沈阳, 2002 年 3 月在北京航空航天大学电子工程系获硕士学位, 现就职于深圳中兴通讯公司南京研发中心. 研究方向为阵列及其在移动通信系统中的应用.



吕善伟 男, 出生于辽宁大连, 北京航空航天大学教授、博士生导师, 天线专业委员会委员, 北京航空航天大学电子专业副主任等, 主要从事射频、微波天线与系统方面的教学与科学研究工作.



毛 峡 女, 出生于浙江. 北京航空航天大学教授, 博士, 主要从事情感信息处理、1/f 波动理论、图像处理、EDA 和智能天线等研究.