

线性约束差分恒模算法

陈长征,王华力,甘仲民
(解放军理工大学通信工程学院,江苏南京 210016)

摘要: 线性约束恒模算法(LCCM)能解决恒模算法(CMA)中存在的干扰捕获问题,但该算法需要将目标模值作为一个参数包含在代价函数中进行优化,因而收敛速度较慢.为克服这一缺点,本文提出了一种线性约束差分恒模算法(LCDCM),它可有效避免对最优值的搜索.在单干扰源的情况下,该算法的收敛速度和干扰抑制度均优于初始值设置不合适的LCCM算法;存在多个干扰源时,即使对LCCM算法的初始值进行最优设置,其对独立干扰源的收敛性能也不如LCDCM算法.

关键词: 线性约束; 恒模算法; 差分恒模; 自适应波束形成

中图分类号: TN927 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 06-0872-04

Differential Constant Modulus Algorithm with Linear Constraints

CHEN Chang-zheng, WANG Hua-li, GAN Zhong-min
(Institute of Communications Engineering, PLAUST, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: Linear constrained constant modulus algorithm (LCCM) is an effective solution to the problem of interference capture in constant modulus algorithm (CMA). But it suffers a slow convergence speed because the target modulus value needs to be included in the cost function to be optimized as a parameter. In order to overcome the shortage, this paper proposes a linear constrained differential constant modulus algorithm (LCDCM), which can avoid the search for optimum value. For the situation of only one interference existed, this proposed algorithm converges faster and mitigates interference more deeply than LCCM algorithm when the initial value isn't properly set. When adaptive array operates in an environment with more than one interference, the LCDCM algorithm has much more convergence characteristic than LCCM algorithm for individual interferences cancellation even when the value is optimally set.

Key words: linear constraints; CMA; DCM; adaptively beamforming

1 引言

与传统天线相比,自适应天线能消除干扰、衰落的影响,增加系统容量,因而广泛应用于移动通信、卫星通信等领域.恒模算法(CMA)是一种常用的自适应波束形成算法,它无需训练信号、收敛速度相对较快、能有效抑制相干干扰,可用于QPSK、GMSK、FM等恒模信号,也可用于某些非恒模信号(如多电平信号束、脉冲成形PSK、QAM信号等)^[1]. CMA算法这种普适特性使得它极易捕获到其他的干扰信号而不是所需信号(SD)(即干扰捕获问题).在一个存在多个恒模信号的环境中,CMA算法究竟捕获哪个信号由初始权矢量和信号的相对功率决定.当信号环境已知时,通过适当选择权矢量迭代初始值能使其捕获到所需信号^[2].但实际信号环境往往很难精确估计出来,特别是在时变环境下,CMA算法捕获的信号难以预测.该问题的解决方法之一是先将其多个恒模阵列级联或并联以捕获所有恒模信号,然后进行进一步处理以确定所需信号^[3,4].当入射信号较多时,算法的工作量是相当大的.另外,

它不能保证同一信号在工作中始终由同一恒模阵列捕获,对该问题的处理增加了整个方案的复杂度.

对CMA算法干扰捕获问题的另一种解决方案是利用所需信号导向矢量来对CMA算法进行约束^[5].该算法的主要缺点是收敛速度太慢,这是由于需要将目标模值作为一个参数和阵列权矢量同时进行优化造成的.

差分恒模算法(DCMA)^[6]是CMA算法的变形,它通过要求波束合成器前后两次输出信号模值的变化最小来对阵列权矢量进行优化,在迭代中无需知道目标模值.借鉴差分恒模的思想,用它对LCCM算法进行改造,可有效避免对目标模值的搜索,提高LCCM算法的收敛速度.

本文将在第二节对LCCM算法作一简单介绍,同时对其存在的问题进行分析.在第三节将差分恒模的思想引入到LCCM算法中去,提出了一种新的线性约束差分恒模算法(LCDCM),并在第四节通过计算机仿真对其性能进行了研究.最后一节对全文进行总结.

收稿日期:2001-04-10;修回日期:2001-12-07

基金项目:国家自然科学基金(No. 69931040)

2 线性约束恒模算法(LCCM)

考虑一具有 M 个阵元的无方向性阵子阵列,其输出信号送入波束合成器进行加权求和.假设 x_m 和 w_m 分别为第 m 个阵元输出信号和波束合成器中相应权值,则波束合成器的输出信号可写为

$$y(t) = \sum_{m=1}^M x_m^*(t) w_m = w^H x \tag{1}$$

其中“ $*$ ”代表共轭,“ H ”代表共轭转置, x 和 w 分别为阵列输出信号矢量和权矢量,它们分别定义为

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_M]^H \tag{2}$$

$$w = [w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_M]^H \tag{3}$$

CMA 算法假设没有噪声和干扰时所需信号波束合成器输出的模值是恒定的,干扰的存在将使输出信号模值发生起伏.它寻求一种最优权矢量使某一代价函数最小来消除这种起伏.其代价函数的一般表达式为

$$Q_{CM}(w) = E\{|y|^p - |y|^{p-q}\} \tag{4}$$

其中 $E\{\cdot\}$ 代表统计平均; \cdot 是一个常量,代表期望的所需信号波束合成器输出幅度,称为目标模值; p 和 q 是常数,一般取 1 或 2.

线性约束恒模算法(LCCM)通过对 CMA 算法权矢量进行约束来解决干扰捕获问题,其代价函数为

$$\begin{cases} \min_w \{E\{|y|^p - |y|^{p-q}\}\} \\ w^H a_0 = 1 \end{cases} \tag{5}$$

其中 a_0 为所需信号的阵列响应矢量.值得注意的是,式(5)的最优化问题中包含了对目标模值的优化求解.在传统无约束 CMA 中,只要求 \cdot 恒定,对其实际取值并无过多要求,不同取值对于权矢量而言只相当于取不同的比例因子而已.不失一般性,它一般取为 1.但是在 LCCM 中则不同,它对权矢量进行了约束,权矢量不再可以随意按比例变化.在一个复杂的信号环境中(特别是存在相干多径或相干干扰时), \cdot 的最优取值一般不能简单的从观测数据测得或预先给定,当信号环境非平稳时更是如此.因此必须把 \cdot 作为一个变量包含到 LCCM 的代价函数中进行求解.这样就增加了需要优化的变量数,降低了算法收敛速度.另外,当 \cdot 初始值与其最优取值偏离较大时,将可能导致算法不能收敛到所需解.

上述问题归根结底都是由于式(5)代价函数中 \cdot 的存在造成的.若对式(5)优化问题进行变形,使之不包含 \cdot ,将有希望使上述问题得到解决.

3 线性约束差分恒模算法(LCDCM)

当 CMA 算法收敛时,波束合成器输出信号的模值将趋于一定值,那么波束合成器输出信号相连两次采样的模值之差也将趋于最小,这就是差分恒模算法(DCMA)的基本原理^[6].它的代价函数为

$$Q_{DCM}(w) = E\{|y(n) - y(n-1)|^p - |y(n) - y(n-1)|^{p-q}\} \tag{6}$$

其中 $y(n)$ 和 $y(n-1)$ 分别为波束合成器在第 n 和第 $n-1$ 个符号时的输出采样值.该算法由于无需指定波束合成器输出

信号的模值,其收敛速度相对 CMA 算法更快一些.

利用差分恒模的思想对 LCCM 算法进行改造,可得到一新的权矢量优化方案

$$\begin{cases} \min_{w(n)} \{E\{|y(n-1)|^p - |y(n)|^p\}^q\} \\ w^H(n) a_0 = 1 \end{cases} \tag{7}$$

我们称之为线性约束差分恒模算法(LCDCM).若将波束合成器初始输出 $y(0)$ 的模值取为 \cdot ,该算法可看成是具有动态模值的 LCCM 算法,它巧妙地避免了 LCCM 中对 \cdot 取值的优化.

式(7)是权矢量的非线性函数,它不存在一显解,对它的求解应采用迭代的方法进行.同时式(7)还是一个线性约束最小化问题,对这类问题的求解方法有约束空间投影法、梯度投影算法、广义旁瓣对消器等^[7].本文利用约束空间投影算法的思想来进行求解.

首先求式(7)的无约束递归表达式.考虑 $p=2, q=2$ 的情形,利用随机梯度下降法可得到一无约束递归解:

$$w_d(n+1) = w(n) + \mu(|y(n-1)|^2 - |y(n)|^2) y^*(n) x(n) \tag{8}$$

然后将式(8)所得无约束权值 $w_d(n+1)$ 投影到线性约束空间 $w^H a_0 = 1$ 进行约束,得到 LCDCM 的递归解

$$w(n+1) = P\{w_d(n+1)\} + w_q \tag{9}$$

其中 μ 为步长因子,它控制算法的收敛速度. μ 越大,收敛越快.但 μ 取的太大,将造成算法不能收敛或不能收敛到所需解. w_q 为归一化的所需信号方向矢量, $P(\cdot)$ 是一投影算子,它们的具体取值如下

$$\begin{cases} w_q = \frac{a_0}{a_0^H a_0} \\ P(w) = \left[I - \frac{a_0 a_0^H}{a_0^H a_0} \right] \cdot w \end{cases} \tag{10}$$

在二维情况下, $P(w)$ 可解释为 w 在直线 $w^H a_0 = 0$ 上的投影,而 w_q 为从直线 $w^H a_0 = 0$ 指向直线 $w^H a_0 = 1$ 的向量,显然 $w(k+1)$ 正好落在 $w^H a_0 = 1$ 上,从而保证了约束条件的满足.

在算法迭代过程中,初始权值 $w(0)$ 取 w_q .

4 计算机仿真

本文利用 5 元均匀圆阵来进行计算机仿真.圆阵半径为 $1/2$ 波长.所需信号 SD 采用 QPSK 调制,符号速率为 T ,信号来向已知.采样速率为 $1/T$.

先考虑只有一个干扰信号

表 1 信号环境 1

信号	到达角	功率
SD(QPSK)	0°	20dB
干扰 SI(FM)	140°	30dB
复白噪声	—	-10dB

时 LCCM 与 LCDCM 的性能.信号环境如表 1 所示,干扰采用幅度恒定的调频(FM)信号,干扰幅度比所需信号幅度大 10dB(此时 CMA 算法最可能捕获到的是干扰而不是所需信号).

当所需信号幅度已知时, \cdot 的最优取值就是信号幅度,取为 10.实验表明,采用 LCCM 和 LCDCM 算法都能保证干扰输出功率达到 -20dB 以下.由于信号收敛速度是与干扰抑制度相关的,为对 LCCM 和 LCDCM 性能进行比较,必须有一统

一标准. 噪声功率为 -10dB, 把干扰功率电平抑制到噪声电平以下并无任何实际意义. 以将干扰电平抑制到低于 -10dB 为准则, 适当选择步长可得到 LCCM 和 LCDCM 需要的最小快拍数分别为 100 和 110 (见图 1), 这说明当 $\theta(0)$ 取最优值时, LCDCM 的性能略差于 LCCM 算法. 这是可以理解的: LCCM 中已收敛到最优值, 无需再对 θ 进行自适应, 而 LCDCM 中还需要连同权重矢量一块进行动态优化.

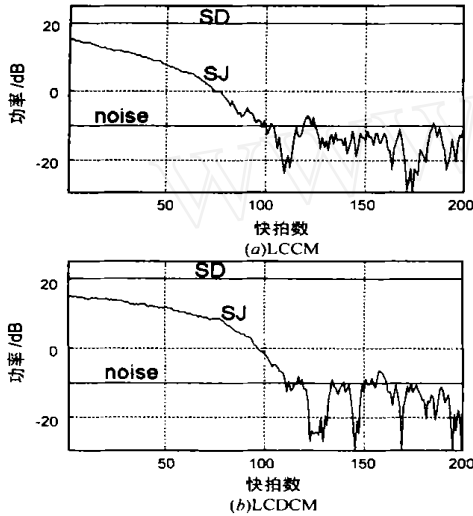


图 1 单干扰信号时波束合成器输出功率与快拍数关系图 ($\theta = 10$)

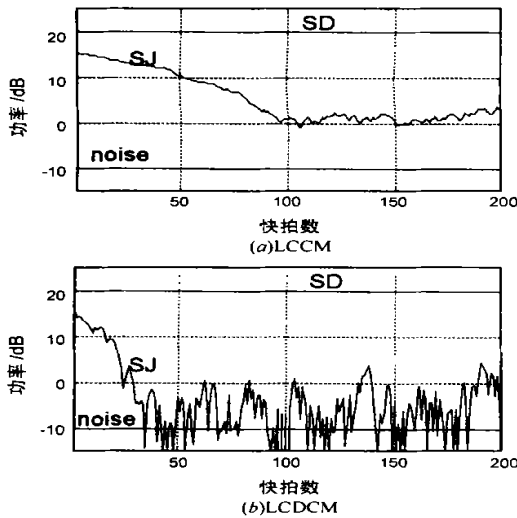


图 2 单干扰信号时波束合成器输出功率与快拍数关系图 ($\theta = 11$)

当所需信号幅度未知或实际幅度与标称幅度有偏差(传输过程中幅度畸变或对信号进行脉冲成形引起的目标模值偏差)时, LCCM 的干扰抑制性能将减弱. 取 $\theta(0) = 11$ (最优值为 10), 通过仿真发现 LCCM 算法对干扰的抑制度不超过 30dB. 当快拍数趋于无穷大时, LCCM 算法干扰输出功率将接近 0dB, 它到达这一干扰抑制度需要的最小快拍数近似为 100, 而 LCDCM 算法仅需 30 个快拍就能到达同样的干扰抑制度 (见图 2). 虽然收敛时 LCDCM 算法干扰输出功率的起伏更大

一些, 但由于此时干扰输出电平已相当低, 起伏对后续的信号解调判决等性能影响并不大.

表 2 信号环境 2

信号	到达角	功率
SD(QPSK)	0°	20dB
SJ1(T/2 延时多径)	40°	15 dB
SJ2 (FM 恒模干扰)	-50°	18dB
SJ2 (FM 恒模干扰)	100°	25dB
复白噪声	—	-10dB

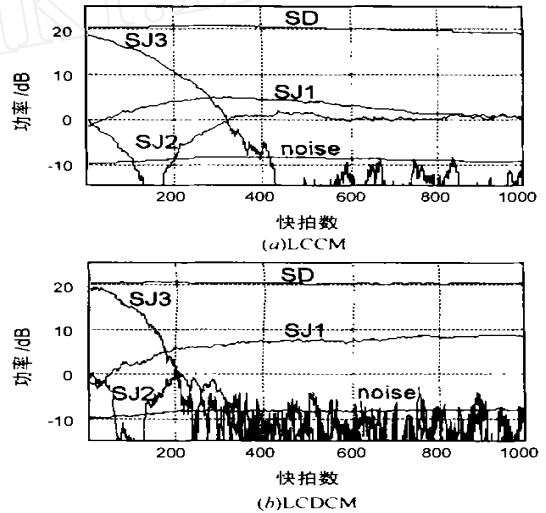


图 3 多干扰信号时波束合成器输出功率与快拍数关系图 ($\theta = 10$)

再考虑存在多个干扰源时的情形(信号干扰参数见表 2). 信号中包含有相干干扰和非相干干扰. 相干干扰取所需信号 SD 在 T/2 延时的多径信号; 非相干干扰有两个, 仍取窄带 FM 信号, 其带宽同所需信号, 功率分别为 18dB 和 25dB. 两种算法的收敛性能见图 3 和图 4: 对于非相干干扰, LCDCM 能将波束零点对准干扰信号来向, 其收敛速度和干扰抑制制度均优于 LCCM 算法, 而 LCCM 算法不能完全收敛到最优值; 对于相干干扰, LCCM 和 LCDCM 算法虽也能进行抑制, 但都不能将波束零点正好对准干扰入射方向, 另外 LCDCM 的干扰抑制制度比 LCCM 算法稍差一些.

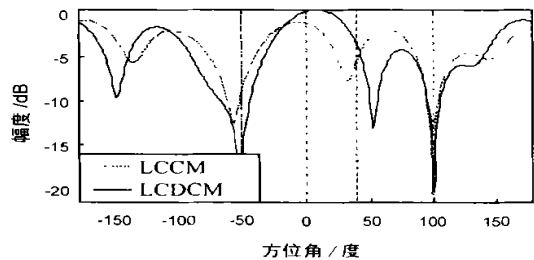


图 4 多干扰信号时波束合成器方向图 (- - - 信号到达角 - - - 干扰到达角)

5 小结

LCCM 算法能有效克服 CMA 算法中存在的干扰捕获问

题,但由于需对目标模值进行优化搜索,算法收敛速度慢.本文提出利用差分恒模的思想对上述算法进行改进,提出了一种 LCDCM 算法,该算法巧妙地避免了对目标模值的搜索,其收敛速度优于所需信号幅度未知或实际值偏离标称值时的 LCCM 算法.当存在多个干扰信号时,本算法对独立干扰源的干扰抑制度和抑制速度仍优于目标模值取最优值(等于所需信号幅度)的 LCCM 算法.最后要提一点的是,步长因子 μ 的取值影响算法的收敛性能,关于 μ 的取值范围等问题还有待进一步研究.

参考文献:

- [1] Lundell J D, Windrow B. Application of the constant modulus adaptive beamformer to constant and nonconstant modulus signals [A]. Proceedings of 21st Asilomar Conference on Signal, System and Computers [C]. Pacific Grove:1987. 432 - 43.
- [2] Takao K, Matsuda H. The choice of initial condition of CMA adaptive arrays [J]. IEICE Transactions on Communications, 1995, E78-B(11): 1474 - 1479.
- [3] Shynk J J, Goch R P. Performance analysis of the multistage CMA adaptive beamformer [A]. IEEE MILCOM Proceedings [C]. New York:1994. 316 - 320.
- [4] Agee B G. Blind separation and capture of communication signals using a multitarget constant modulus beamformer [A]. IEEE MILCOM Proceedings [C]. New York:1989. 340 - 346.
- [5] Rude MJ, Griffiths L J. Incorporation of linear constraints into the constant modulus algorithm [A]. Proceedings of ICASSP [C]. Glasgow UK:1989. 968 - 971.
- [6] Nishimori K, Kikuma N, Inagaki N. The differential CMA adaptive array antenna using an eiger-beamspace system [J]. IEICE Transactions on Communications, 1995, E78-B(11): 1480 - 1488.

- [7] Haykin S. Adaptive filter theory [M]. NJ: Prentice-Hall, 1996. 220 - 235.

作者简介:



陈长征 男, 1975 年出生于安徽绩溪, 1996 年毕业于解放军电子工程学院, 1999 年获信号处理硕士学位, 现在解放军理工大学通信工程学院攻读博士学位, 目前主要从事智能天线、干扰源定位、盲信号处理等方面的研究工作。



王华力 男, 1967 年出生于浙江温岭, 分别于 1993 年和 1997 年在南京理工大学获硕士和博士学位, 1997 年至 1999 年为通信工程学院卫星通信重点实验室博士后, 现为解放军理工大学通信工程学院副教授, 通信学报编委, 中国电子学会高级会员, IEEE Member, 目前主要从事卫星通信系统、电子防护和智能天线方面的研究工作。



甘仲民 男, 1937 年出生于广西南宁, 1963 年毕业于通信兵工程学院, 现为解放军理工大学教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 长期从事卫星与微波通信系统的教学、科研工作, 独立或与他人合作在国家核心刊物及国内外学术会议上发表论文约百篇, 主要论著有《卫星通信系统》(合编著)、《微波及其应用》。