

文章编号:1000-582X(2002)09-0046-04

统一扩频测控系统接收信号处理技术*

冯文江¹,赵峰¹,杜坚²,杨士中¹

(1.重庆大学通信工程学院,重庆400044;2.西南石油学院,四川南充637001)

摘要:统一扩频测控体制的多飞行器测控系统应用自适应天线数字多波束形成技术对目标实施跟踪和测控。采用恒模阵列和自适应信号对消器估计出各个信号的波达方向(DOA),应用最小干扰噪声功率判据获得最优加权向量。为了提高天线系统的处理增益,用最优加权向量形成波束,有效地消除多址干扰的影响。波束形成处理器得到的相对相位偏移向量用于上行遥控信号分时发送时,形成对指定目标的高增益波束。对恒模阵列和自适应信号对消器估计获得的导向向量用于数字多波束形成的性能进行了仿真研究。

关键词:测控技术;数字波束形成;恒模算法

中图分类号:TN911.7

文献标识码:A

采用统一扩频测控体制^[1]的多飞行器测控系统,不仅能实现多种测控信号的“统一”,而且隐蔽性好、保密性高、抗干扰能力强,有利于抑制多径干扰。由于被测控目标在时空上的随机性和目标跟踪上的实时性需求,为了在多飞行器环境下实施测控,应采用自适应天线系统。因此,测控系统首先需要研究自适应天线阵列的波束形成问题,通过寻求加权因子使得在测控系统中对期望信号的有效跟踪。

常用的阵列信号处理方法,如 MUSIC^[2]、ESPRIT^[3]等,在高 SNR、大量观测数据和空间非相关噪声或已知相关噪声条件下能给出接近 Cramer-Rao 下界的精确估计。但如果上述条件不满足,性能会严重下降。笔者基于统一扩频测控信号的传输特性,应用恒模阵列^[4](Constant Modulus Algorithm: CMA)和自适应信号对消器结合,在没有训练信号的情况下估计出期望信号的波达方向(DOA)。利用波达方向估计获得的导向向量和数字波束形成技术生成高增益波束,能有效提高接收信号处理增益。在上行分时发送遥控信号时,依靠下行获得的相位偏移量使阵因子具有聚合作用,形成对指定目标的波束。

1 测控系统结构

多飞行器测控系统结构如图1所示。

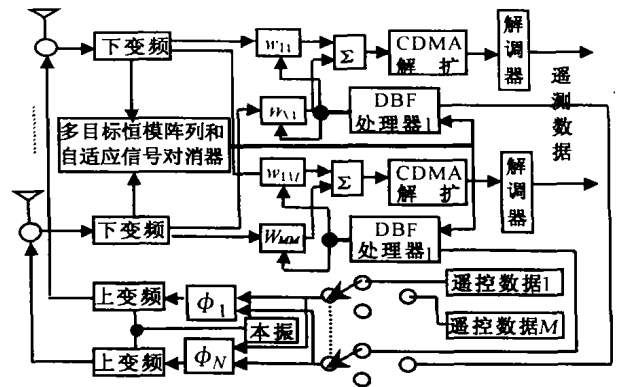


图1 多飞行器测控系统结构框图

设空间被测控的飞行器有 M 个,天线系统由 N 个阵元组成等距线阵。对于下行遥测信号接收,每个阵元接收信号经过环形器和混频器后一方面送入多级恒模阵列和自适应信号对消器,获得各个期望信号波达方向(DOA)估计。另一方面由 DBF 处理器构成的波束形成器按照一定的优化规则获得复数加权因子,使得数字波束输出信号干扰噪声比(SINR)达到最优。再经下变频、

* 收稿日期:2002-05-18

基金项目:重庆大学引进人才基金资助项目

作者简介:冯文江(1963-),男,四川西充人,重庆大学教授,博士后。主要从事通信与测控技术、通信信号处理和 GPS 应用技术等方面的研究。

A/D 变换后得到数字基带扩频信号,以便进行数字化解扩、解调处理,从而得到各个目标的遥测信息。相对于文献[5]的方法,解扩信噪比增加了 $10 \lg N$ (dB),有利于捕获 PN 码。对于上行遥控信号发送而言,各个飞行器上行遥控数据的扩频调制信号,按照时分复用(Time-Division Multiplex)方式顺序送出,每一个目标占一个时隙。当时分开关顺序转换到位置 j ,准备传送第 j 个目标的上行数据时,根据 DBF 处理器中形成的相位偏移量,改变上行波束形成的相位加权量,最后经上变频、功率放大器、环形器送到 N 个阵元,依靠阵因子的聚合作用形成波束,向第 j 个飞行器发射上行信号。

2 信号处理

2.1 天线系统数学模型

测控系统采用统一扩频体制,数字调制为 BPSK。组成天线系统的等距线阵的各个阵元为各向同性的。远场平面波信号包括 M 个辐射源,对于任意一个处理器而言,只有一个有用信号、 $M - 1$ 个干扰信号。不失一般性,以处理器 1 为研究对象,设辐射源 1 为有用信号,其余为干扰信号。 t 时刻阵列接收信号复包络可表示为:

$$X(t) = a(\theta_1)s_1(t) + \sum_{i=2}^M s_i(t)a(\theta_i) + n(t) = a(\theta_1)s_1(t) + \tilde{A}\tilde{s}(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, $X(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_N(t)]^H$ 为阵元接收信号列向量, $\tilde{s}(t) = [s_2(t) \ s_3(t) \ \dots \ s_M(t)]^T$ 为干扰源辐射强度向量, $s_1(t)$ 为有用信号辐射强度, $s(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_M(t)]^T$, $\tilde{A} = [a(\theta_2) \ a(\theta_3) \ \dots \ a(\theta_M)]$ 为干扰信号阵列导向矩阵, $n(t) = [n_1(t) \ n_2(t) \ \dots \ n_N(t)]^T$ 为阵元热噪声,假设为空间零均值白噪声且与所有的辐射源信号无关,其噪声功率为 σ_n^2 。

$$a(\theta_i) = [1 \ \dots \ \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_i) \ \dots \ \exp(j \frac{2\pi}{\lambda} d (N-1) \sin \theta_i)]^T \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (2)$$

表示阵列接收第 i 个辐射源的方向向量, d 为阵元间距, λ 为信号波长。

$$s_i(t) = A_i d_i(t - \tau_i) PN_i(t - \tau_i) \cos(\omega_0 t + \phi_i) \quad (3)$$

式中 $d_i(t)$, $PN_i(t)$, A_i , τ_i 分别为第 i 个用户的信息比特,扩频序列,载波振幅以及到参考相位中心的随机时延。显然,接收信号复包络具有恒模特性。

令 $A = [a(\theta_1) \ \tilde{A}]$, $1, 2, \dots, K$ 为采样时刻,式(1)对应的采样数据:

$$X(k) = As(k) + n(k) \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

2.2 恒模算法

恒模阵列加自适应信号对消器结构如图 2 所示。

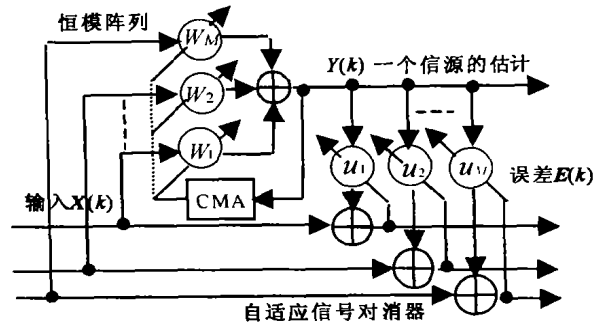


图 2 恒模阵列加自适应信号对消器结构

CMA 的基本思想是:恒模信号在经过信道后,产生幅度扰动(衰落),可以定义一种“恒模”准则使自适应滤波器的输出恢复成恒模信号。1986 年 Gooch 等人将 CMA 推广到自适应天线^[6]中,其主要特点是信号的恢复,无需参考信号,依靠的先验知识仅是信号的恒模特性。恒模阵列用一种在线的自适应方式,直接用接收信号估计某个待估来波信号,同时还能得到该信源波达方向估计。如果天线系统接收多个目标信号,可以采用图 3 所示的多级恒模阵列进行分离。

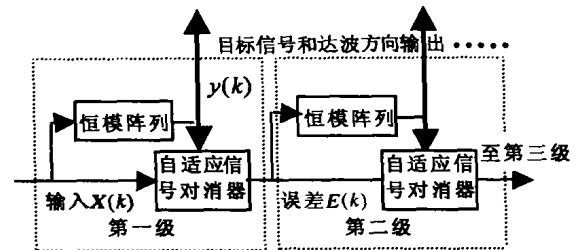


图 3 多级恒模阵列加自适应信号对消器结构

为了得到各个来波方向估计,对各个阵元接收信号进行复数加权求和得到输出信号为:

$$y(k) = X^T(k)W(k) = S^T(k)A^T W(k) + n^T(k)W(k) \quad (5)$$

其中, $W(k) = [W_1(k) \ W_2(k) \ \dots \ W_N(k)]^T$ 为复数加权向量。

CMA 的代价函数为:

$$J = E[| |y(k)|^p - \sigma^p |^q]$$

其中, $E[\]$ 为数学期望, σ 为包络值,参数 p, q 为正整数,决定 CMA 的收敛行为。CMA 的功能就是使得代价函数为最小,由此计算出加权因子。采用递推最小二乘自适应算法(Recurrence Least Squares:RLC),通常 $p = 1, q = 2, \sigma = 1$,代价函数调整为^[6]:

$$J = \sum_{k=1}^i [\lambda^{i-k} | |y(k)| - 1|^2] \quad (6)$$

其中 λ 称为遗忘因子, $0 < \lambda < 1$ 。自适应加权向量的更新如下:

$$W(k) = W(k-1) + K(k)\varepsilon(k) \quad (7)$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)X(k)}{\lambda + X^T(k)P(k-1)X(k)} \quad (8)$$

$$P(k) = \lambda^{-1}[I - K(k)X^T(k)]P(k-1) \quad (9)$$

$$\varepsilon(k) = y(k)/|y(k)| - y(k) \quad (10)$$

经过一级恒模阵列, 分离出某个目标的辐射信号。为了获得被捕获目标的波达方向估计以及为后续分离其他目标辐射信号, 恒模阵列后加入自适应信号对消器。令误差向量:

$$E(k) = X(k) - u(k)y(k) \quad (11)$$

其中自适应信号对消器的加权向量为 $u(k) = [u_1(k) \ u_2(k) \ \dots \ u_M(k)]^T$, 应用 LMS(Least Mean Square) 算法更新:

$$u(k) = u(k-1) + 2\mu y^*(k)E(k) \quad (12)$$

式中迭代步长 $0 < \mu < 1/\sigma_y^2$, $\sigma_y^2 = E[|y(k)|^2]$ 。在最小均方误差(MMSE)意义下, 最优加权向量为:

$$u_{opt} = (\sigma_{s_i}^2/\sigma_y^2) a(\theta_i) \quad (13)$$

对于均匀等距线阵, 根据方向向量表达式(2)可以由 u_{opt} 得到 $\sigma_{s_i}^2/\sigma_y^2$ 和波达方向估计 $\hat{\theta}_i$ 。

2.3 自适应波束形成算法

仅应用多级恒模阵列加自适应信号对消器结构只能对多个接收信号进行分离, 无法获得高的信号处理增益。笔者仅用它来获得波达方向估计, 结合自适应波束形成算法提高接收系统处理增益, 降低对 CDMA 解扩器的要求。设天线阵列自适应波束形成复数加权矢量用 V 表示, 则天线阵输出为:

$$G_1(t) = V^H \cdot X(t) = V^H \cdot a(\theta_1)s_1(t) + V^H \cdot [\tilde{A}s(t) + n(t)] = V^H \cdot a(\theta_1)s_1(t) + e(t) \quad (14)$$

式中, $V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_M]^H$; $e(t)$ 表示干扰和噪声作用产生的无用输出。

波束形成问题归结为如下优化问题:

$$\min E[e(t)^H e(t)] \quad \text{s.t.} \quad V^H a(\theta_1) = 1 \quad (15)$$

应用文献[7]的结论, 根据拉格朗日乘子法, 优化问题的解为:

$$V_{opt} = \frac{Ua(\theta_1)}{\sqrt{a^H(\theta_1)Ua(\theta_1)}} \quad (16)$$

式中 $U = I - A(A^H A)^{-1}A^H$ 为 A 的列张成空间的正交互补子空间的投影矩阵。

3 计算机仿真

输出信号干扰噪声比 r_{SNR} 定义为输出信号功率 P_s 与输出干扰功率 P_I 及噪声功率 P_N 之和之比:

$$r_{SNR} = \frac{p_s |V^H \cdot a(\theta_1)|^2}{V^H R_{yy} V + \sigma_n^2} \quad (17)$$

其中, p_s 为阵元接收有用信号功率, $R_{yy}(t) = E[\tilde{y}(t)\tilde{y}^H(t)]$, $\tilde{y}(t) = \tilde{A}s(t)$ 。

仿真参数为: 等距线阵具有 16 个各向同性阵元 ($N = 16$), 间距为 $\lambda/2$, 阵元热噪声功率为 -5 dB, 有用信号功率为 -25 dB, 各种干扰信号功率为 10 dB, 扩频码长为 127, 数字调制方式为 BPSK, 接收系统采用相干解调方式。图 4 为利用该测控系统处理后得到的平均误码率。假定需要跟踪和测控的目标有两个, 来波方向分别为 $\theta_1 = 5^\circ, \theta_2 = 58^\circ$, 利用笔者提出的信号处理算法, 首先用多级恒模阵列加自适应信号对消器结构估计波达方向, 然后用自适应波束形成算法得到的方向图如图 5 所示。应用恒模算法能同时估计出各个目标的来波方向, 因此简化了整个系统 DOA 估计的计算过程。就每一个被跟踪的目标而言, 数字波束形成产生的波束对准来波方向, 提高了接收信号的信噪比, 结合扩频技术能有效减小多址干扰。

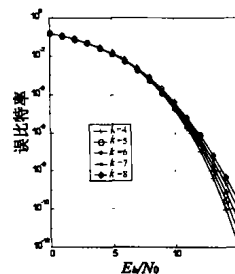


图 4 平均误码率

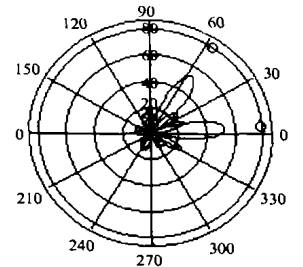


图 5 多波束形成方向图

4 结 论

在多飞行器测控环境下, 应用恒模阵列和自适应信号对消器获得各个信号波达方向估计, 简化整个系统 DOA 估计的计算过程。为了提高天线系统的处理增益, 再用最优加权向量形成波束, 提高了接收信号的信噪比, 有效地消除多址干扰的影响。DBF 处理器得到的相对相位偏移向量用于上行遥控信号分时发送时, 形成对指定目标的波束。当然, 文中采用的算法仅适用于等距线阵, 而面阵天线的自适应波束形成问题以及对于不同干扰环境下和不同性质信号的波束形成问题仍需继续研究。

参考文献:

- [1] 杨士中. 飞行器的测控及遥感图像传输体制与系统[J]. 电子学报, 1993, 26(4): 71 - 76.
- [2] SERPEDIN E, GIANNAKIS G B. Blind channel identifications and equalizations with modulation - induced cyclostationary. IEEE Trans Signal Processing, 1998, 46(1): 1 930 - 1 944.
- [3] ROY R, PAPPAPORT T S. ESPRIT—A subspace rotation approach to estimation of parameters of cissoids in noise [J]. IEEE Trans ASSP, 1986, 34(2): 1 340 - 1 342.
- [4] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 384 - 397.
- [5] FENG WENJIANG, YANG SHIZHONG, YU PING. A new technique of the multi - targets management in small satellites system[A]. Proc 2001CIE Radar[C]. Beijing: 2001. 740 - 742.
- [6] GOOCH R P, LUNDELL J D. An adaptive beamformer for constant modulus signals[A]. Proc IEEE ICASSP - 86[C]. Japan: 1986. 2 523 - 2 526.
- [7] ALEX B G. Constrained Hung - Turner Adaptive Beamforming Algorithm with Additional Robustness to Wideband and Moving Jammers[J]. IEEE Trans On AP, 1996, 44(3): 361 - 366.

Digital Beamforming for Unified Spread Spectrum TT&C System

FENG Wen - jiang¹, ZHAO Feng¹, DU Jian², YANG Shi - zhong¹

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Southwestern Petroleum Institute, Nanchong Sichuan 637001, China)

Abstract: In TT&C system, unified spread spectrum framework and adaptive antenna digital beamforming technologies are used to track, telemetry and command objects. Constant modulus array (CMA) and adaptive signal canceller estimate the direction of arrival (DOA) of every signal and use the optimum weighted vector to form the beams. The phase-weighted vectors estimated from DOA improve the processing gain as well as being utilized in the transmitting of tele-command signal to form the beam of specified object. Its processing performance is researched and simulated in this paper.

Key words: TT&C technology; digital beamforming; CMA

(责任编辑 张 苹)

(上接第 45 页)

Application of Wavelet & Multi - Resolution Analysis to Detection of the Time of PN Code Acquisition

YANG Jie¹, ZHONG Yuan - chang¹, ZENG Xiao - ping², XU Ji - gang²

(1. College of Communication, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China)

Abstract: In the field of CDMA system, DS - SS technology has been used widely. Thereby, a great deal research on acquisition method of PN code is based on DS - SS. In the traditional way, the power detection method of judgment is used widely. Based on the characteristic of PN code acquired signal (namely BPSK signal or QPSK signal) and characteristic of un-acquired signal (namely white Gaussian noise), this paper introduces the wavelet detection method of PN code acquisition time. Meanwhile, the performance of wavelet threshold is also studied. In the end, the statistics of parameters in this detection method is made. The result indicates that the wavelet & multi-resolution has practical value in the signal processing.

Key words: wavelet transform; acquisition aetection; threshold

(责任编辑 吕赛英)