

# 自适应调零天线对快速跟踪干扰抑制的研究

邱永红,甘仲民,李广侠,朱德生

(解放军理工大学通信工程学院,南京 210016)

**摘要:** 为了有效地抑制来自跳频卫星通信系统上行链路的快速跟踪干扰,本文提出了一种数字波束形成与跳频相结合的新型干扰抑制技术(AJDBFFH)。基于AJDBFFH技术,本文较好地解决了快速跟踪干扰与跳频有用信号相关所带来的干扰抑制问题。通过对快速跟踪干扰抑制的计算机仿真,其结果表明,AJDBFFH技术可以有效地抑制快速跟踪干扰,系统的误码率性能得到了明显的改善。

**关键词:** 卫星通信; 数字波束形成; 自适应调零天线; 干扰抑制

**中图分类号:** TN927 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 04-0574-04

## Research on Using Adaptive Nulling Antenna Against the Fast Follower Jammer

QIU Yong-hong, GAN Zhong-min, LI Guang-xia, ZHU De-sheng

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to effectively suppress the fast follower jammer from up-link in frequency-hopping satellite communication systems, a novel jamming suppression technique (AJDBFFH) of combining digital beamforming (DBF) with frequency-hopping (FH) is presented. The jamming suppression problem of signal correlation between the fast follower jammer and the desired signal is solved by using AJDBFFH technique. Computer simulation results show this technique against the fast follower jammer is very effective and the error bit rate performance is improved.

**Key words:** satellite communications; digital beamforming; adaptive nulling antenna; jamming suppression

### 1 引言

为了有效地抑制来自上行链路的干扰,卫星通信系统可以采取多种空间段的抗干扰技术<sup>[1]</sup>。在这些抗干扰技术中,自适应调零天线与跳频技术的相互结合,能够在弥补各自技术缺点的同时,发挥各自技术的优点,产生最理想的抗干扰效果<sup>[2,3]</sup>。自适应调零天线与跳频技术相结合作为一种综合卫星通信抗干扰技术,受到了越来越广泛的重视<sup>[4]</sup>。

数字波束形成(DBF)与跳频这两种技术都属于比较成熟的技术,人们对它们各自的性能都做了比较多的研究工作<sup>[5,6]</sup>,但是如何将这两种技术有机地相结合来提高卫星通信系统的综合抗干扰能力,尤其是对抗来自上行链路的快速跟踪干扰,这方面的研究报告至今为止还没有看到。为此,论文提出了一种新型的卫星通信抗干扰技术——数字波束形成与跳频相结合的干扰抑制技术(Anti-Jamming of Digital Beamforming and Frequency-Hopping/AJDBFFH)。与以往采用跳频作为单一抗干扰手段的卫星通信系统所不同的是,AJDBFFH技术是在跳频抗干扰技术基础上,充分利用有用信号和快速跟踪干扰在时域上的差异,用DBF技术将与信号来向不同的干

扰加以有效的抑制。

### 2 设计思想

在跳频系统中应用自适应天线调零技术,频率跳变和快速跟踪干扰所带来问题的解决将依赖于波束形成网络中自适应算法的收敛速度,而自适应算法的收敛速度又取决于波束形成技术<sup>[8]</sup>。在数字波束形成技术中,其波束形成网络是放在模/数(A/D)变换之后,而天线阵的各单元在A/D变换之前均拥有独立的接收信道,对信号采样所得的数字信号可保留所有的空间信息。一旦选定自适应算法,则自适应算法的收敛速度完全取决于A/D转换器的抽样速度。A/D转换器的抽样速度可以达到几百兆赫,这对系统解决由于频率跳变和快速跟踪干扰所引起的问题,是非常有益的。

基于上述的考虑,本文提出了数字波束形成与跳频相结合的新型卫星通信干扰抑制技术(AJDBFFH)。系统组成示意图如图1所示,设: $K$ 为天线阵元个数,空间中有 $N$ 个信号源,其中, $N$ 包括 $L$ 个有用信号源和 $N-L$ 个干扰信号源。分析图1,该系统的工作过程如下:

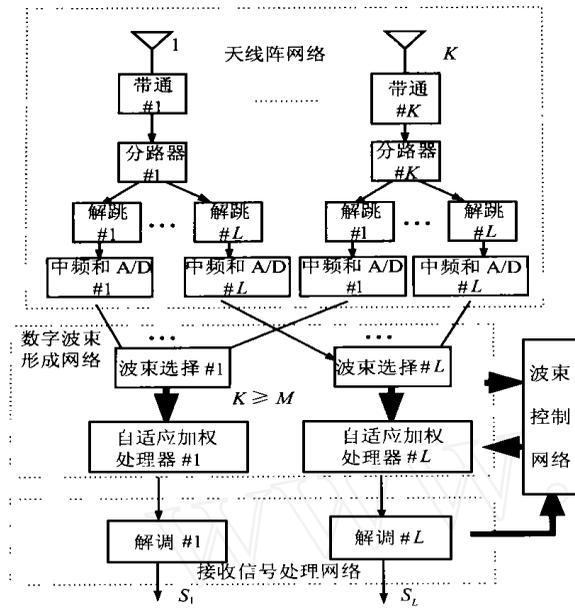


图 1 AJDBFFH 接收系统组成示意图

(1) 天线阵网络的作用是通过  $K$  个带通滤波器(其带宽为跳频信号频率集的带宽)和分路器,将  $L$  个用户的有用信号分别进行相应的解跳、中频滤波和 A/D 变换,这样,非用户所需信号和干扰信号将不能通过特定用户的解跳器,从而减轻了数字波束形成网络的压力;

(2) 在数字波束形成网络中,  $L$  个波束选择器是用于分别从  $K$  个波束中选取某个有用信号所需的波束数  $M$  ( $K \geq M \geq N$ ),在跳频频率周期内,自适应加权处理器对这  $M$  个波束分别进行各自的加权,从而形成有用信号的输出,这样,使得与有用信号来自不同的其他信号均得到有效的抑制,从而减轻了接收信号处理网络解调处理的压力;

(3) 接收信号处理网络将所接收的有用信号还原为相应的基带信号  $s_i$  ( $i = 1, 2, \dots, L$ ),同时,将信号接收的状况,实时地反馈给波束控制网络用于进行加权值的更改,以适应系统对抗干扰性能指标的要求;

(4) 根据有用信号和干扰信号到达方向(DOA)信息,波束控制网络采用自适应算法对  $M$  个不同波束形成相应的加权值,其目的是使  $L$  个波束的主瓣自适应地对准各自的通信方向,同时对于特定用户而言,自适应地使  $N - 1$  个波束零点对准其余  $L - 1$  个非用户的通信方向和  $N - L$  个干扰方向。

### 3 干扰抑制的分析

由于快速跟踪干扰所特有的特性,决定了快速跟踪干扰与跳频有用信号是相关的<sup>[3]</sup>。解决这个问题的设计思想是:根据 AJDBFFH 技术的特点,设计一种波束控制网络,在这种波束控制网络的作用下,快速跟踪干扰与跳频有用信号互不相关,这样,通过采用 AJDBFFH 技术,就可以将快速跟踪干扰进行有效的抑制。为此,本文提出了采用由波束预选处理器和权矢量控制器共同来构成波束控制网络的设计方案。其结构如图 2 所示。

分析图 2:来自  $K$  个天线阵元的第  $i$  个用户的信号,经过解跳、A/D 变换及波束选择等过程处理后,输入到自适应加权处理器 #  $i$  及波束控制网络的信号均为窄带信号。波束控制网络的作用是负责提供自适应加权处理器 #  $i$  所需要的加权值,而自适应加权处理器 #  $i$  则利用这个加权值对输入信号进行信号处理。在这里,加权值的获取是关键。如何来获取当有用信号与干扰信号是互不相关时的加权值呢?这就得依靠波束控制网络来实现。由于快速跟踪干扰的到达时间要滞后于有用信号的到达时间,因此,可以利用有用信号和快速跟踪干扰在时域上存在差异的特点。在波束控制网络中,波束形成预选处理器的作用是将有用信号调零,这时进入到权矢量控制器的信号只有干扰信号;权矢量控制器的作用是将干扰信号调零,所得到的加权值被复制到自适应加权处理器 #  $i$ ,这个加权值就等效于当有用信号与干扰信号是互不相关时,自适应加权处理器 #  $i$  所需要的加权值。

图 3 是采用 AJDBFFH 技术来抑制快速跟踪干扰的示意图,其中,  $T_{hop}$  是一个跳周期,  $T_{majd}$ 、 $T_{majn}$  分别为有用信号调零和快速跟踪干扰调零所允许的最大时间。随着快速跟踪干扰跳速的提高,有用信号的跳速也应随之增加,才能有效地对抗快速跟踪干扰。AJDBFFH 技术的应用,使得系统在对抗快速跟踪干扰的问题上,并不是仅仅依赖提高系统的跳速,而是通过在一个跳周期  $T_{hop}$  内,尽可能地缩短调零时间  $T_{majd}$ 、 $T_{majn}$  ( $T_{majd} + T_{majn} \ll T_{hop}$ ),来减少快速跟踪干扰对有用信号的影响,因此,可以适当降低有用信号的跳速,来提高系统的可实现性。

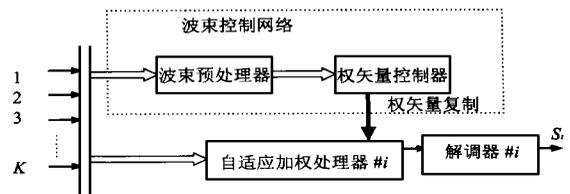


图 2 波束控制网络组成示意图

调零时间  $T_{majd}$ 、 $T_{majn}$  的缩短取决于自适应算法的收敛时间,在本文中,采用具有快速收敛特性的直接矩阵求逆(DMI)算法作为波束预选处理器和权矢量控制器的自适应算法。与 LMS、RLS 等闭环算法相比,通过开环运算来得到最优加权值的 DMI 算法,其特点是具有更快的收敛速率,其所获权矢量仅仅取决于信号取样协方差矩阵(基于最大信号干扰噪声比准则)。DMI 算法的缺陷是其实用性受信信号矢量维数(决定于自适应处理器的自由度)的限制<sup>[7]</sup>,矩阵求逆的运算量比较大,另外,当求逆的协方差矩阵是病态矩阵时,矩阵求逆会得不到自适应权矢量的精确解。但是,在通信领域,由于天线的阵元数与雷达系统相比要少得多,因此,通过采取一定的措施<sup>[8]</sup>,如天线阵元数的减少、采用部分自适应阵,提高自适应处理器的工作速度等,均可以使通信系统承受 DMI 算法所需要的计算量,并且,可使求逆的协方差矩阵出现病态矩阵的可能性非常小。

设有用信号为  $s(t)$ ,参考信号为  $d(t)$ ,且  $d(t) = s(t)$ ,

根据维纳解的结果,DMI 算法的最优权矢量解可以表达为<sup>[7]</sup>:

$$W_{opt} = R_{xx}^{-1}r_{xd} \quad (1)$$

式中,  $( )^{-1}$ 表示求逆,  $R_{xx}$ 是信号矢量  $x$  (包括有用信号  $s(t)$ 、干扰信号  $j(t)$ 和信道噪声  $n(t)$ )的协方差矩阵,  $r_{xd}$ 是信号矢量  $x$ 和参考信号  $d(t)$ 间的交叉相关矢量。

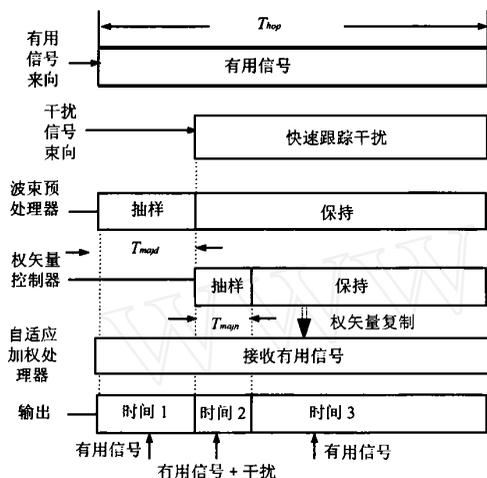


图3 快速跟踪干扰抑制过程示意图

用于波束控制网络的 DMI 算法的迭代流程步骤如下:

(1)波束预处理器在  $T_{majd}$ 内,由于干扰信号尚未出现(为方便说明,假设其方向已知),则  $x(t) = s(t) + n(t)$ . 为了形成权矢量控制器所需要的输入信号,波束预处理器根据天线阵元数目的情况,在  $K$ 个波束中分别选取  $P$ 组有用信号所需的波束数  $M$ ,将各组的波束调零方向对准来自特定方向的有效信号,而将波束主瓣对准干扰的方向;

(2)权矢量控制器在  $T_{majn}$ 内,由于波束预处理器的  $P$ 组输出信号中,只有干扰而没有有用信号,则  $x(t) = j(t) + n(t)$ . 为了获得自适应加权处理器所需要的权矢量,权矢量控制器将波束调零方向对准干扰的方向,而将波束主瓣对准有用信号的方向;

(3)自适应加权处理器根据复制的权矢量(权的总数为  $P$ ),在  $K$ 个波束中选取  $P$ 个波束,来形成有用信号的接收波束,此时,  $x(t) = s(t) + j(t) + n(t)$ .

### 4 仿真结果

为了验证采用 AJDBFFH 技术对快速跟踪干扰抑制的有效性,本文对由八个阵元的圆阵阵列(圆半径为  $R = 0.8710$ ,各个阵元之间的间隔相同)构成的天线进行了计算机仿真. 仿真环境为:(1)设信号的入射范围是  $-3^\circ \leq \alpha \leq 3^\circ, -3^\circ \leq \phi \leq 3^\circ$  为仰角,  $\phi$ 为方位角,快速跟踪干扰的入射角度为  $(2^\circ, 2^\circ)$ ,而跳频有用信号的入射角度为  $(0^\circ, 0^\circ)$ ;(2)设 A/D 转换器的抽样速率  $f_s$ 为 1MHz;(3)设有用信号的信噪比为  $E_d$ ,干扰信号的干噪比为  $E_j$  ( $E_j \gg 1$ ).

为了获得系统误码率的改善量,仿真中选取了若干个  $E_j/E_d$  典型值.图4表示在不同的  $E_j/E_d$ 时,采用全向天线与

采用 AJDBFFH 技术时仿真所分别得到的系统误码率.可以看出:(1)对于相同的  $E_j/E_d$ ,采用 AJDBFFH 技术时系统误码率要小于采用全向天线时的系统误码率,这说明系统误码率性能得到了改善;(2)随着  $E_j/E_d$  的增加,系统误码率的改善量逐渐减少,这说明在有用信号功率一定时,快速跟踪干扰的功率越大,系统误码率的改善将有所减弱.

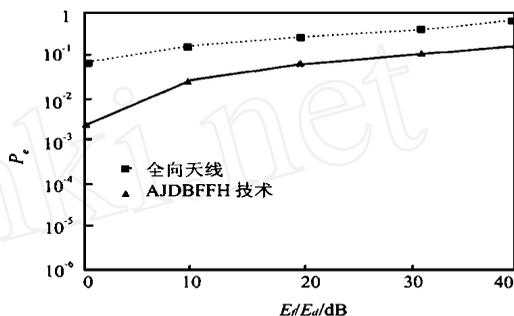


图4 系统误码率与  $E_j/E_d$  的关系曲线图

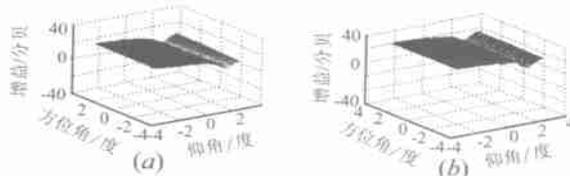


图5 天线自适应空间示意图

图5是跟踪干扰被完全抑制的自适应空间示意图,其中,波束预处理器  $T_{majd} = 10\mu s$ ,权矢量控制器  $T_{majn} = 10\mu s$ ,图5(a)为  $E_j = 30dB, E_d = 20dB$ ,图5(b)为  $E_j = 50dB, E_d = 30dB$ .可以看出,通过波束控制网络的处理,快速跟踪干扰与有用信号的相关问题得到了较好地解决,同时,快速跟踪干扰得到了有效的抑制.

### 5 结束语

为了有效地抑制来自跳频卫星通信上行链路的快速跟踪干扰,本文提出了一种新型的干扰抑制技术(AJDBFFH)技术,重点讨论了采用 AJDBFFH 技术来抑制快速跟踪干扰的方法和过程.仿真结果表明:AJDBFFH 技术可以有效地抑制快速跟踪干扰.本文的探讨是初步的,有许多问题仍需要作深入的研究,如,自适应算法的进一步研究、多个快速跟踪干扰的抑制问题、系统参数的优化设计问题等.

### 参考文献:

[1] 甘仲民. 军用卫星通信抗干扰综述 [J]. 军事通信技术, 1998, 66 (2): 1 - 12.

[2] Kesh Bakhru. Spatial acquisition of wideband frequency-hopping signals using adaptive array processing [A]. IEEE MILCOM '88 [C]: 23. 2. 1 - 23. 2. 6.

[3] Fail Eken. Use of antenna nulling with frequency-hopping against the following jammer [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1991, 39(9): 1391 - 1397.

- [ 4 ] Asato M S. A high-capacity ,anti-jam EHF " bent-pipe " satellite/ central-hub system architecture concept [ A ] . IEEE MILCOM '95 [ C ] :722 - 730.
- [ 5 ] John Litva. Digital Beamforming in Wireless Communications [ M ] . Artech House ,Boston ,London ,1996.
- [ 6 ] 朱近康. 扩展频谱通信及应用 [ M ] . 中国科技大学出版社 , 1993.
- [ 7 ] Robert A. Monzingo . Thomas W. Miller. Introduction to Adaptive Arrays [ M ] . John Wiley and Sons , Inc. 1980.
- [ 8 ] 邱永红. 基于数字波束形成与跳频相结合的干扰抑制技术研究 [ D ] . 博士学位论文 ,南京 :解放军理工大学 ,2000.
- [ 9 ] 邱永红 ,甘仲民. 基于自适应数字波束形成技术的跳频干扰抑制性能研究 [ J ] . 通信学报 ,2000 ,21 ( 7 ) :39 - 44.
- [ 10 ] 邱永红 ,甘仲民. 卫星通信上行链路跳频快速跟踪干扰抑制的研究 [ J ] . 解放军理工大学学报 ( 自然科学版 ) ,2000 ,1 ( 4 ) :11 - 18.

#### 作者简介 :



邱永红 1964 年出生 ,1985 年、1988 年和 2000 年在南京解放军理工大学通信工程学院分别获得工学学士学位、硕士学位和博士学位 . 主要研究方向为卫星移动通信、卫星抗干扰技术及自适应信息处理 ,获得多项研究成果 ,发表论文三十余篇 .



甘仲民 教授 ,博士生导师 ,中国电子学会会士 . 1963 年毕业于重庆通信兵工程学院雷达系 . 现在南京解放军理工大学通信工程学院从事微波与卫星通信教学与科研工作 ,已发表论文共百余篇 ,主要著作有《卫星通信系统》等 .

# 电子学报

2001 年第 4 期 Acta Electronica Sinica No. 4 2001

(总期 206 期) (Monthly) (Series No. 206)

主办单位 中国电子学会  
 协办单位 中国计算机报社  
 编辑 《电子学报》编辑委员会  
 主编 王守觉  
 总编辑 刘力  
 通信处 北京 165 信箱  
 (邮政编码 100036)  
 电话 (010)68279116 ,68285082  
 传真 (010)68173796  
 排版印刷 中国纺织印刷厂  
 国内总发行 北京市报刊发行局  
 国外总发行 中国国际图书贸易总公司  
 国内订购处 全国各邮电局

Published by the Chinese Institute of Electronics ,Beijing  
 China Infoworld  
 Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica  
 Chief Editor :Wang Shoujue  
 Director :Liu Li  
 Editorial Office of Acta Electronica Sinica ( P. O. Box 165 ,  
 Beijing 100036 ,China)  
 Tel 86-10-68279116 ,68285082  
 Fax 86-10-68173796  
 Printed by Textile Printinghouse ,China  
 Distributed by  
 Domestic :Beijing Baokan Faxingju ,China  
 Foreign :China International Book Trading Corporation  
 Subscription Office ——All Local Post Offices in China

刊号 : ISSN 0372 - 2112  
 CN11 - 2087/ TN

邮发代号 (国内/ 国外) :2 - 891/ M436

国内定价 20.00

