

基于改进最小均方算法的卫星多波束形成技术

张宇萌, 杨明川, 刘晓锋, 张中兆

(哈尔滨工业大学通信技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 高通量卫星采用多波束技术实现极化隔离和空间隔离以复用频率资源, 从而使通信容量成倍增加, 但对快速的自适应波束形成算法提出了更高的要求。为了解决采用 LMS 算法进行波束形成时收敛速度与稳态误差不能同时满足的缺点, 提出一种改进的最小均方算法, 它使用统计平均进行梯度更新解决瞬时梯度导致的形成波束不稳定问题, 旨在波束形成开始阶段加快速度, 而在收敛达到稳定状态后保持小的误差值。考虑在高通量卫星强降雨衰减的环境中, 仿真应用 61 阵元正六边形排布相控阵天线形成 7 点波束。结果显示改进算法在仅少量增加复杂度的情况下大幅提高了收敛速度并获得了更优的稳态性能, 可应用于应急通信场景下存在严重波束间同频干扰的高通量卫星波束形成技术。

关键词: 高通量卫星; 信道模型; 多波束; 波束形成; 最小均方算法

中图分类号: TN927

文献标识码: A

Improved least mean square algorithm based in satellite multi-beamforming

ZHANG Yu-meng, YANG Ming-chuan, LIU Xiao-feng, ZHANG Zhong-zhao

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: High-throughput satellites use multi-beam technology to achieve polarization isolation and spatial isolation to reuse frequency resources, resulting in increased traffic capacity, but this presents a higher demand for fast adaptive beamforming algorithms. In order to solve the shortcoming that the convergence rate and steady-state error can not be satisfied simultaneously when using the LMS algorithm, an improved least mean square algorithm was proposed, which used the statistical average gradient update to solve the problem of the formation of beam instability caused by the instantaneous gradient, which can speed up at the beginning of the beamforming and maintain a small error value after the convergence has reached a steady state. The use of 61-element hexagonal array phased array antenna to form a 7-point beam in an environment where high-throughput satellites have a strong rainfall attenuation was considered. The results show that the improved algorithm can greatly improve the convergence speed and obtain better steady state performance under the condition of only a small increase in complexity, which can be applied to high-throughput satellite beamforming technology with severe inter-beam co-channel interference in emergency communication scenarios.

Key words: high throughput satellite, channel model, multi-beam, beamforming, least mean square algorithm

1 引言

随着全球移动互联网的发展和个人消费者对“无所不在”的网络需求, 有着“运行在高频段、吞吐量很高、提供宽带互联网接入服务”特点的高通量卫星通信系统是当今的发展趋势^[1]。在具有同

样频谱资源的条件下, 高通量卫星应用多波束技术和频率复用技术获得数倍于固定移动卫星的通信容量。多波束技术是高通量卫星中的一种关键综合技术, 它是指通过波束形成网络在一定覆盖范围形成若干大小相同的点波束, 并且根据卫星通信系统的需求和组网形式进行波束规划, 不同波束间独立

收稿日期: 2017-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91438205, No.91538104)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.91438205, No.91538104)

进行通信^[2]。由此导致的波束间同频干扰问题不容忽视也严重影响了卫星性能,类似于地面蜂窝移动通信系统中的小区间干扰。但对于高通量卫星,卫星功率和星上载荷资源受限,在数字域动态的形成波束以应对干扰被认为是最好的解决方法之一^[3,4]。本文针对高通量卫星自适应波束形成技术进行研究,旨在提出能动态应对波束间干扰的一种自适应波束形成算法。卫星波束覆盖示意如图 1 所示。

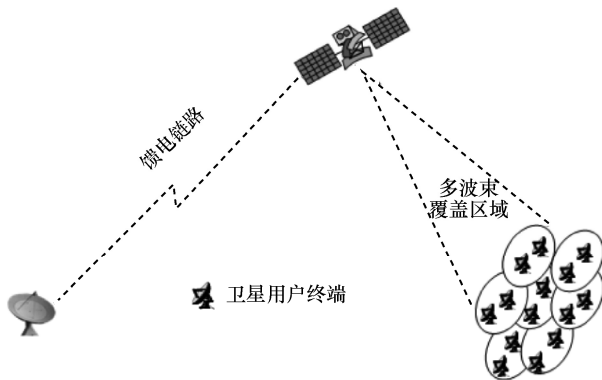


图 1 卫星多波束覆盖

在代表着多波束卫星通信系统核心的波束形成网络中,采用自适应波束形成算法以动态适应卫星信道特性及发送信号特性的变化。由于星地之间链路是低反馈、高时延信道,因此,通过星上较低反馈次数构建多用户传输系统是算法选择的难点。基于最小均方差准则(MMSE)的最小均方算法(LMS)凭借其收敛快、误差小和复杂度低等优点得到广泛应用。

LMS 算法应用广泛,但应用在卫星多波束形成中,需要其针对既定场景获得相应的性能改进。由于 LMS 算法是一种快速算法,不能完全达到应用最陡下降算法获得的性能,据此,文献[5~7]对 LMS 算法的各影响因素进行研究,并分别提出了基于多种变式算法,如归一化 LMS 算法、SLMS 算法和变步长 LMS 算法,在梯度平滑估计时,能获得优于典型 LMS 算法的性能。LMS 算法以获得最小均方误差为目标,并据此形成代价函数,文献[8,9]对代价函数进行了研究,分别基于非线性特性和稀疏特性提出 2 种优化的代价函数。在卫星波束形成技术中,需要一种复杂度较低且能快速稳定形成波束的算法。在这一背景下,陆乐^[10]提出了一种抗干扰子空间正交投影的快速零陷波束形成算法,算法运算速度很快,并能在主瓣具有较高指向性增益的前提下实时调整零陷位置跟踪干扰源。基于卫星高吞吐量的业务需求,文献[11]也提出了一种应用于卫星

相控阵天线的数字波束形成算法,另外,为了减轻星上载荷压力,将波束形成网络放置在地面的自适应波束形成技术也在文献[12]被提出。

基于上述研究分析,在需要快速波束形成的高通量卫星应急通信场景下,应用收敛快且复杂度低的 LMS 算法是一种很好的选择。但要解决它不能同时满足收敛性能和稳态性能的缺点,并且要考虑卫星波束形成技术中星上处理能力、相控阵排布和多用户间同频干扰等问题。本文提出一种改进的 LMS 算法,算法在迭代运算初期以少量运算量的增加换取收敛的速度和稳定性,在达到收敛后继续使用更低运算量的典型 LMS 算法进行跟踪,验证其是卫星波束形成技术中的一种低复杂度高性能的波束形成算法。

2 卫星多波束形成技术

卫星多波束形成技术中根据波束形成网络位置区分成星上波束形成技术和地基波束形成技术^[13]。星上波束形成技术中,波束形成网络接收来自馈电链路的信号,并传送至用户链路。在星上处理时经历模拟/数字波束形成、频率复用/解复用、干扰消除、交换、信号电平控制等过程,如图 2 所示。

但是高通量卫星波束数目越来越多,星上有限的载荷满足不了巨大的信号处理需求,也不能灵活调整业务分配,故当前研究将星上波束形成网络部分或全部转移到地面的波束形成方式。地基波束形成技术原理如图 3 所示。

在将星上波束形成网络转移到地面后,卫星的载荷部署被极大程度简化,同时地面信号处理设备相比星上廉价且简易,故总体成本和复杂度都被极大程度的降低。在系统功能的角度,采用地基波束形成技术能快速形成数目不同、各自独立的频段发射接收点波束,从而灵活分配卫星容量及系统带宽。阵元的馈电信号要以频分复用的方式经由馈电链路传送,这需要极大的馈电链路带宽。

由表 1 地基波束形成技术和星上波束形成技术功能对比可知,星上波束形成技术在形成大量点波束时负担很大,无法应用多网关结构解决馈电链路带宽受限的问题,有限且昂贵的星上载荷难以灵活满足业务动态需求。地基波束形成技术带来相当多的好处,但也存在很多问题,如需要为地面站和卫星部分的性能变化进行补偿,包括卫星和地面站的指向误差、信号传播幅度衰减和相位散射效应。

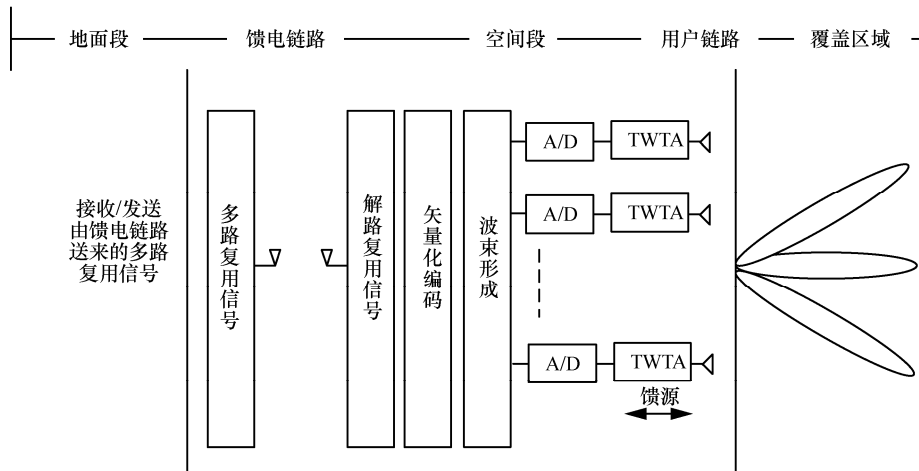


图 2 星上波束形成技术结构

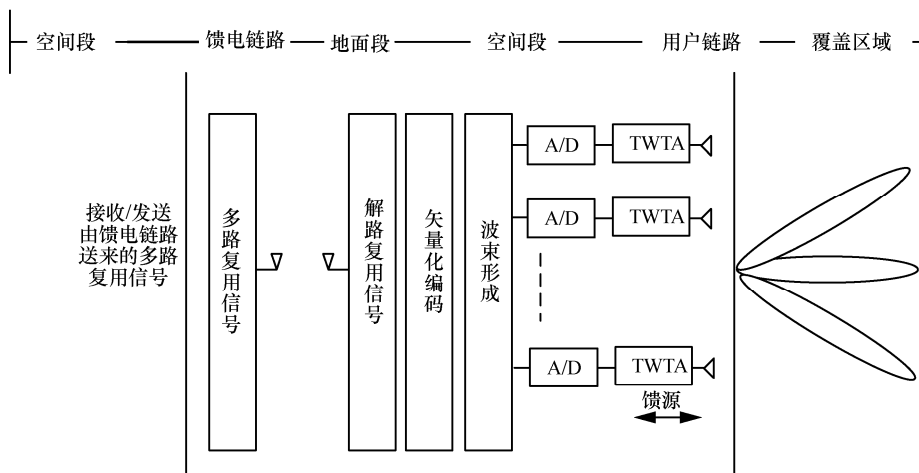


图 3 地基波束形成技术结构

表 1 星上/地基波束形成结构功能对比

参数	星上波束形成	地基波束形成
C 频段网关数	单一	多个
Ku 频段网关数	单一	多个
Ka 频段网关数	单一	单一
波束重构性能	支持	支持
馈电链路带宽	<300 MHz	>1 200 MHz
移动性能	只支持单跳	支持双跳
干扰消除能力	静态消除	动态消除
地面设备及操作复杂度	很少且不复杂	很多且复杂
通道内均衡	出场校正	连续校正
多普勒补偿	支持	不支持
算法升级	不支持	支持升级且可改变波束数目

另外，为了减轻地基波束形成技术馈电链路带宽的压力，可以采用天基—地基混合波束形成架构^[14]。波束形成网络将从星上经由馈电链路延伸至地面

信关站，天基地基部分相结合，整体实现波束形成功能，这种技术体系称之为星地一体波束形成，如图 4 所示。

3 系统模型

在采用相控阵天线进行数字形成波束的卫星系统中，本文分析阵元排布方式和波束覆盖形式对多波束卫星系统性能的影响。在选取合适的排布模型后，本文也分析了数字域波束形成对应的数学模型。

3.1 阵元排布方式和波束覆盖形式

多波束天线的结构设计就是要利用较少的阵元个数去构造大的阵列排布以获得大的增益，同时也要注意旁瓣、波束交叠等性能的恶化。对于相控阵天线，其采用的阵元一般是微带天线，尤其要注意减轻阵元间的耦合，尽量增加阵元间距是目前较

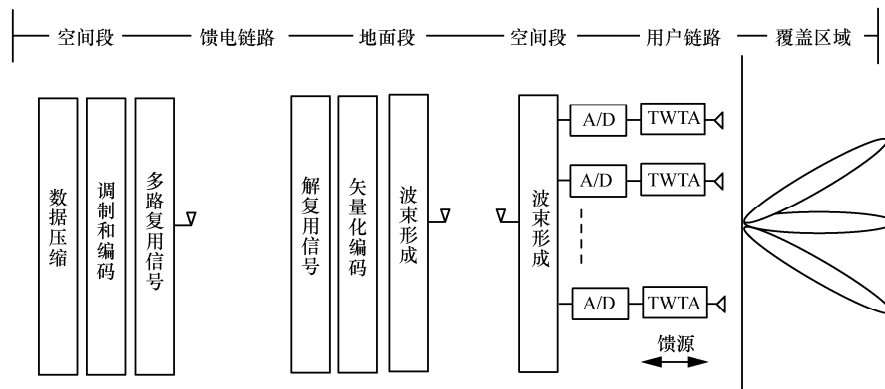


图 4 星地一体波束形成技术结构

为有效的办法。

星载相控阵天线采用三角形栅瓣的阵元排列方式排成正六边形以等效于同等数目阵元的圆阵，此方式形成的口径面积最大即增益最大^[15]。根据辐射原理，要保证可见区内无栅瓣，阵元间距应满足 $d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\max}}$ ，其中， θ_{\max} 是最大波束扫描角。本文采用 61 阵元相控阵天线，其中， $\theta_{\max} = 45^\circ$ ，故可取 $d = 0.5\lambda$ 。

卫星波束覆盖时选择等波束面积的方式，每一波束覆盖相等面积的地球表面。选择典型的 7 个点波束进行等波束面积的覆盖，内层为一个中心波束，外层为均匀排布的 6 个波束，这种波束覆盖方案具有一定程度的通用性，它和更多波束的覆盖基本方式一致。

在采用 61 阵元形成 7 波束时，存在 2 种波束形成方案，即每个波束均用 61 个阵元加权作用形成波束，另一种是每个波束是由 19 个阵元参与形成。其构造如图 5 所示。图 5 中每个波束是由 19 个阵元形成的，故波束内部最多可以形成 18 个零点。每个阵元的作用不均等，在内部的阵元在形成多个波束时都被采用，存在多次复用。波束内可形成零陷点数的增加对于达到高增益和低旁瓣的覆盖性能有极大好处，但也增大了系统的负担和复杂度^[16]。

3.2 卫星自适应波束形成技术

卫星自适应波束形成技术的基本原理是根据一定的准则和算法自适应地调整阵列天线阵元激励的权值，使阵列接收信号经过加权叠加后，输出信号在所采取的准则下最优。波束形成网络

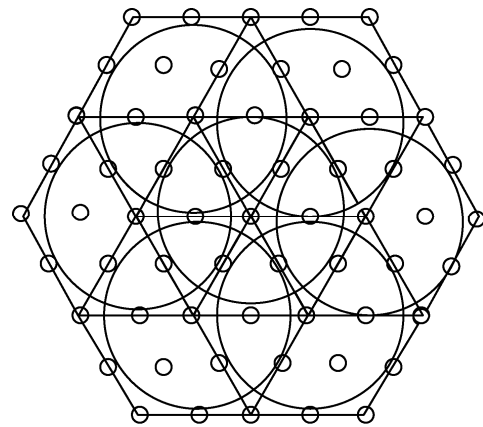


图 5 61 阵元形成 7 波束结构

通过加权计算令阵列方向图的主瓣指向有用信号，在干扰信号方向形成零陷或较低的旁瓣，从而将不同用户或信号在空间上实现分隔，起到空间滤波的作用。

图 6 是自适应波束形成原理。在星载数字波束形成网络中，信号带宽满足远远小于载波频率的窄带需求，故可认为不同馈源间的微小延时可以用相移来代替。在窄带信号模型中，馈源对同一波束信号的响应只差一个相位，其延时远远小于符号长度。

对于具有 N 个馈源的星载相控阵天线，考虑单个波束的形成过程。信号在发射端表示为 $s(t)$ ，信道增益表示为 $h(t)$ ，入射信号的方位角和俯仰角分别为 θ 和 φ ，则馈源的接收信号向量可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(\theta, \varphi)\mathbf{h}(t)s(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中， $\mathbf{a}(\theta, \varphi) = (1, e^{-j\phi_2(\theta, \varphi)}, \dots, e^{-j\phi_N(\theta, \varphi)})^T$ 表示阵列的空间响应向量，由馈源的相对几何关系决定。

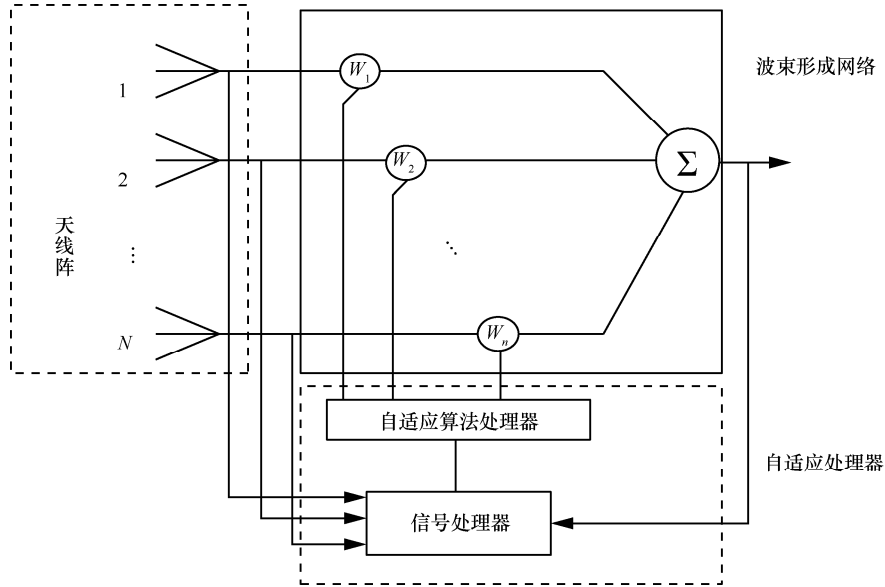


图 6 自适应波束形成原理

$\mathbf{n}(t) = (n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t))^T$ 表示馈源的噪声向量，其为独立分布的高斯白噪声。

对于数字波束形成系统，基于离散信号模型可以有在第 n 个快拍时刻，馈源接收信号表示为

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{a}(\theta, \varphi) \mathbf{h}(n) s(n) + \mathbf{n}(n) \quad (2)$$

对于 K 个波束的多用户波束形成，接收信号可以表示为

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{i=1}^K \mathbf{a}(\theta_i, \varphi_i) \mathbf{h}(n) s_i(n) + \mathbf{n}(n) \quad (3)$$

再经由波束形成网络对馈源信号进行加权处理后生成所需指向及信号特性的波束信号。可以表示为

$$\mathbf{y}(n) = (w_1(n), w_2(n), \dots, w_N(n))^H \mathbf{x}(n) \quad (4)$$

4 改进最小均方误差波束形成算法

在波束形成网络中，最小均方算法通过发送信号中显式的、在接收端已知的训练序列，并利用这些训练序列和接收信号的误差值进行迭代跟踪，进而获得阵元权值并形成波束。

最小均方算法 (LMS) 指在最小均方误差准则 (MMSE) 下，通过最陡下降搜索使得输出信号与有用信号之间的均方误差最小化。从求解方法来看，LMS 是基于最陡下降梯度的估计算法，通过反馈运算更新权值，跟踪系统统计特性的变化，而不用求解维纳方程，在一定的合适条件下，获得逼近维纳的最优解。在 LMS 算法中，定义关于加权向

量 \mathbf{w} 的连续可微代价方程 $J(\mathbf{w})$ ，并令每一次迭代满足 $J(\mathbf{w}(n+1)) \leq J(\mathbf{w}(n))$ ，且

$$J(\mathbf{w}(n)) = \sigma_d^2 - \mathbf{w}^H(n) \mathbf{p} - \mathbf{p}^H \mathbf{w}(n) + \mathbf{w}^H(n) \mathbf{R} \mathbf{w}(n) \quad (5)$$

其中， σ_d^2 为理想响应 $s(n)$ 的方差， \mathbf{p} 表示输入向量 $\mathbf{x}(n)$ 与理想输出 $s(n)$ 的互相关向量， \mathbf{R} 为输入向量 $\mathbf{x}(n)$ 的自相关矩阵。基于局部迭代寻求最快下降路径的机理连续调整 \mathbf{w} ，使其沿最陡下降方向变化，令 $J(\mathbf{w})$ 的变化梯度为 $\mathbf{g} = \nabla J(\mathbf{w}) = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{w}}$ ，可以将最陡下降算法表示为

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{1}{2} \mu \mathbf{g}(n) \quad (6)$$

LMS 算法中对 \mathbf{R} 和 \mathbf{p} 进行瞬时估计进而实现对梯度向量的估计为

$$\{\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{u}(n) \mathbf{u}^H(n), \hat{\mathbf{p}} = \mathbf{u}(n) d^*(n)\} \quad (7)$$

LMS 的权值向量递归关系可以表示为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{w}}(n+1) &= \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu [\hat{\mathbf{p}} - \hat{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{w}}(n)] \\ &= \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu \mathbf{u}(n) [d^*(n) - \mathbf{u}^H(n) \hat{\mathbf{w}}(n)] \end{aligned} \quad (8)$$

可以看出每次迭代包含 $2M+1$ 次复数乘法和 $2M$ 次复数加法运算，算法运算量十分小，也不存在大规模矩阵求逆的复杂运算。对于算法的波束形成性能，可以通过以下标准进行衡量：1) 收敛速度；2) 权值跟踪性能；3) 波束形成性能。

最小均方误差算法中，算法步长 μ 用来控制

LMS 算法的稳态误差与收敛速度。其中，收敛速度用来表示算法跟踪信号变化的能力，稳态误差表示算法收敛后相对期望信号的差值。研究表明，选择较大的步长可以获得较快的收敛速度，但与此同时，权值向量收敛后会产生较大程度的波动，产生不稳定的阵列方向图导致失调。相反，如果步长较小，收敛速度将十分缓慢，但是收敛后性能较好且不会产生大幅度的波动。

步长 μ 用来控制 LMS 算法的稳态误差与收敛速度，其中，收敛速度用来表示算法跟踪信号变化的能力，稳态误差表示算法收敛后相对期望信号的差值。研究表明，算法稳定也及稳态误差小的步长条件为 $0 \leq \mu \leq \frac{1}{\lambda_{\max}}$ ，自适应 LMS 算法跟踪信号

的收敛时间通常为 $t = \frac{1}{\mu \lambda_{\min}}$ 。其中， λ_{\min} 和 λ_{\max} 分别是相关矩阵的最小特征值和最大特征值。选择较大的步长进行算法收敛，可以获得较快的收敛速度，但与此同时，权值向量收敛后会产生较大程度的波动，产生不稳定的阵列方向图，产生失调量。相反，如果步长较小，收敛速度将十分缓慢，但是收敛后性能较好，不会产生大幅度的波动。由此分析可以看出，LMS 在算法的稳态误差和收敛速度这两性能上存在矛盾。如图 7 和图 8 分别对比了步长值为 0.05、0.01 和 0.005 时的误差特性和权值递归特性。

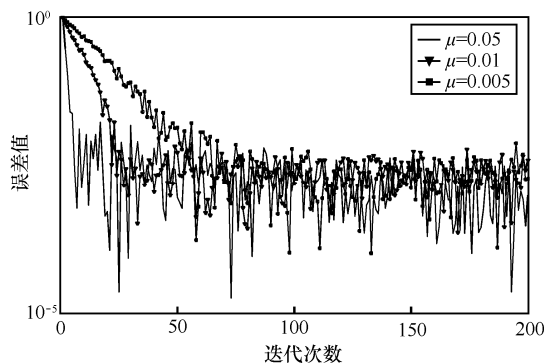


图 7 误差特性曲线对比

对比图 7 和图 8 可以得出结论，步长大，收敛快，但稳态时波动较大，反之，步长小收敛慢，但稳态时波动较小，由此分析可以看出，LMS 在算法的稳态误差和收敛速度这 2 种性能间存在矛盾，故在不改变步长 μ 的情况下，合理选择梯度向量更新方式，进而达到快收敛和小稳态误差是星载波束形

成技术的难点。故亟待一种既能较快收敛又能获得较小误差的改进最小均方算法。

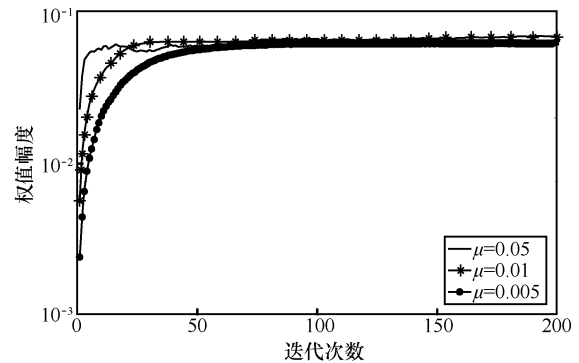


图 8 权值递归特性曲线对比

LMS 算法是基于最速下降法的简易算法，最速下降法的核心是通过有限个取样值进行统计平均，它不需要了解误差特性表面的先验知识，而典型 LMS 算法实际是用瞬时值对梯度矢量的相关估计，这带来很大程度的震荡和较慢的收敛速度。本文提出一种改进的最小均方误差算法，对比典型 LMS 算法，改进算法旨在波束形成开始阶段加快速度，而在收敛达到稳定状态后保持小的误差值。

改进 LMS 算法前 $M-1$ 个采样点权值迭代依然选择典型算法的方式，从第 M 个采样点开始，下一次迭代采用的加权修正量为

$$\delta \mathbf{w}(n+1) = \frac{\sum_{i=n-M+1}^n \mu(u(i)\mathbf{e}^*(i))}{M} \quad (9)$$

每次取当前点和前 $M-1$ 个时刻的信号误差值和信号值做统计平均进而减少算法开始阶段波动误差大导致的收敛缓慢的问题，一定程度上改善采用单独一点瞬时值带来的若干问题。而针对不同环境，设定采样门限值 L ，在采样点数超过门限值时继续使用典型 LMS 算法进而减小算法复杂度。

改进 LMS 算法的实现步骤如下。

步骤 1 初始算法步长 μ 、采样点数 M 和点数门限 L

步骤 2 输入误差值 $e(x)$ 、信号值 $x(n)$

步骤 3 当 $n < M$ 时，

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{e}^*(n)\mathbf{x}(n) \quad (10)$$

步骤 4 当 $n \geq M$ 且 $n < L$ 时，

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu \sum_{i=n-M+1}^n e^*(n)x(n)}{M} \quad (11)$$

步骤 5 当 $n \geq L$ 时,

$$w(n+1) = w(n) + \mu e^*(n)x(n) \quad (12)$$

5 算法仿真与性能分析

卫星波束形成技术中选用的自适应波束形成算法应同时满足能够快速形成和形成波束后方向图稳定这 2 个性能。基于上述 LMS 算法性能影响因子的分析, 本节仿真验证改进算法能否满足卫星波束形成技术的性能需求。

对于 Ka 频段的 GEO 卫星, 采用改进最小均方算法和典型最小均方算法对其进行快速波束形成, 波束覆盖的前向链路下行信道可认为是慢衰落信道, 在一个时隙内发送的信号经历的衰落特性相同。仿真参数如表 2 所示, 雨衰模型为 ITU-R 所提供。

仿真分别应用改进 LMS 算法和典型 LMS 算法形成单波束, 其中, 降雨衰减是慢变的且只与用户所在波束位置有关, 再经由改进算法收敛后获得的权值向量进行点波束的形成, 验证其波束形成性能的好坏。设定改进算法和典型算法的步长 $\mu=0.01$, 改进算法采样点数 $M=15$, 点数门限 $L=100$ 。

表 2 仿真模型参数

参数	数值
轨道高度/km	35 786
载波频率/GHz	20
用户带宽/MHz	500
阵元数目	61
波束数目	7
气候状况	雷雨
3 dB 波束宽度/ $^\circ$ (单边)	0.6

仿真部分以单点波束分别应用改进 LMS 算法和典型 LMS 算法为例, 其中, 降雨衰减是慢变的且只与用户所在波束位置有关, 再经由改进算法收敛后获得的权值向量进行点波束的形成, 验证其波束形成性能的好坏。

图 9 是典型 LMS 算法和改进 LMS 算法误差特性曲线对比, 可以看出改进算法在 40 点处已达到

其收敛门限, 进入稳态阶段, 而典型 LMS 算法在 60 点以后达到收敛, 并且稳态误差波动大于改进算法, 即改进算法在收敛速度和稳态误差 2 个方面都达到了较优的状态。

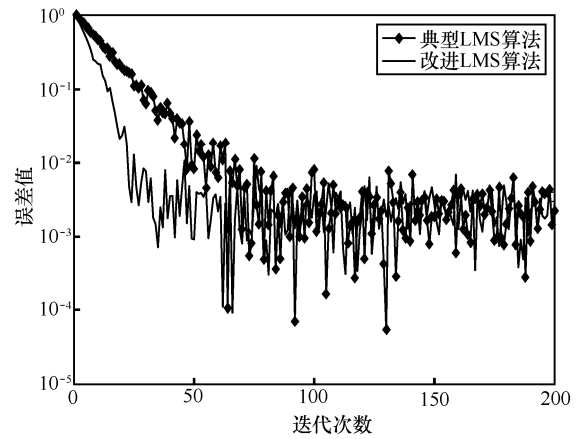


图 9 改进算法与典型算法误差特性曲线对比

图 10 是改进 LMS 算法和典型 LMS 算法权值迭代关系图。对于 61 阵元排布, 其每个阵元都参加波束的形成, 阵元作用相同, 取第 26 个阵元的权值, 对比其权值幅度关系可以看出, 在迭代初期剧烈的波动后, 改进算法在 25 点左右就收敛至最优权值, 这远远快于典型 LMS 算法。

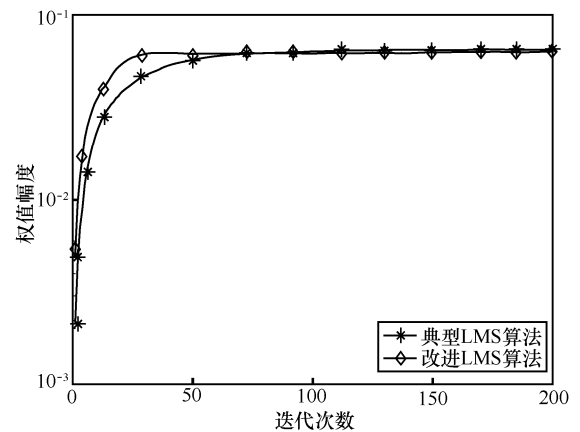


图 10 改进算法与典型算法权值递归特性曲线对比

$$\text{由于 } w(n+1) - w(n) = \frac{\mu \sum_{i=n-M+1}^n e^*(n)x(n)}{M}, \text{ 在权}$$

值递归过程中, 权值变化量 $\delta(w+1)$ 中误差和输入值乘积项由于采用了统计平均计算, 受单时刻点不稳定造成的影响较典型算法大幅减小, 故可以更快收敛且误差波动更小。改进算法的运算量仅在采样

门限值前有少量的增加,但仍和典型的算法在一个数量级上。仿真结果表明改进 LMS 算法在同典型 LMS 算法采用相同迭代步长的情况下能大幅提升波束形成速度并获得较好的稳态性能。

6 结束语

本文主要研究高通量卫星自适应波束形成技术,分析了星载、地基和星地一体的波束形成架构,并提出了一种改进最小均方波束形成算法。改进 LMS 算法应用统计平均方式进行梯度更新,解决了典型 LMS 算法收敛速度和稳态误差不能同时满足的缺点,并在考虑高通量卫星强降雨衰减的环境下进行仿真。对比典型 LMS 算法,改进算法在相同条件下波束形成速度更快并且方向图更稳定。

参考文献:

- [1] KATONA Z, CLAZZER F, SHORTT K, et al. Performance, cost analysis, and ground segment design of ultra high throughput multi-spot beam satellite networks applying different capacity enhancing techniques[J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2016, 34(4):547-573.
- [2] RAO S K, CHIH-CHIEN H. Advanced multiple beam antenna system supporting multiple satellite communications services[C]// Asia Pacific Microwave Conference. 2008: 1-4
- [3] COTTATELLUCCI L, DEBBAH M, GALLINARO G, et al. Interference mitigation techniques for broadband satellite systems[J]. Public Organization Review, 2013, 7(2):163-180.
- [4] DEVILLERS B, PEREZ-NEIRA A, MOSQUERA C. Joint linear precoding and beamforming for the forward link of multi-beam broadband satellite systems[C]//Global Communications Conference. 2011:1-6.
- [5] AL-ARDI E M, SHUBAIR R M, AL-MUALLA M E. Performance evaluation of the LMS adaptive beamforming algorithm used in smart antenna systems[C]//Midwest Symposium on Circuits and Systems. 2004: 432-435.
- [6] SENAPATI A, GHATAK K, ROY J S. A comparative study of adaptive beamforming techniques in smart antenna using LMS algorithm and its variants[C]//International Conference on Computational Intelligence and Networks. 2015:58-62.
- [7] BISMOR D. LMS algorithm step size adjustment for fast convergence[J]. Archives of Acoustics, 2012, 37(1):31-40.
- [8] CHOUVARDAS S, DRAIEF M. A diffusion kernel LMS algorithm for nonlinear adaptive networks[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 2016:4164-4168.
- [9] JAHROMI M N S, SALMAN M S, HOCANIN A, et al. Convergence analysis of the zero-attracting variable step-size LMS algorithm for sparse system identification[J]. Signal Image & Video Processing, 2015, 9(6): 1353-1356.
- [10] 陆乐. 星载智能天线空域抗干扰快速算法研究[D].南京: 南京理工大学, 2017: 14-34.
LU L. A fast algorithm for spaceborne anti-jamming of spaceborne smart antenna[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017: 14-34.
- [11] LI W, HUANG X, LEUNG H. Performance evaluation of digital beamforming strategies for satellite communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2004, 40(1):12-26.
- [12] XIAO L, COTTATELLUCCI L, GHANEM S A M. Adaptive beamforming in mobile, massively multiuser satellite communications: a system perspective[C]//Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the, Signal Processing for Space Communications Workshop. 2015:51-58.
- [13] TRONC J, ANGELETTI P, SONG N, et al. Overview and comparison of on-ground and on-board beamforming techniques in mobile satellite service applications[J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2014, 32(4):291-308.
- [14] ARTI M K, BHATNAGAR M R. Beamforming and combining in hybrid satellite-terrestrial cooperative systems[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(3):483-486.
- [15] YANG F, HUANG M, ZHANG S, et al. Multi-layer beam architecture in mobile satellite communications[C]//International ICST Conference on Communications and Networking in China. 2011: 1115-1119.
- [16] MONTESINOS J, BESSON O, LARUE d T C. Adaptive beamforming for large arrays in satellite communications systems with dispersed coverage[J]. IET Communications, 2011, 5(3):350-361.

作者简介:



张宇萌 (1995-), 男, 黑龙江海伦人, 哈尔滨工业大学硕士生, 主要研究方向为卫星通信系统多波束技术。



杨明川 (1977-), 男, 甘肃靖远人, 博士, 哈尔滨工业大学副研究员, 主要研究方向为卫星移动通信系统、高空平台站通信系统及深空通信网络等。



刘晓锋 (1961-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学教授, 主要研究方向为新一代卫星通信系统、微小卫星测控通信技术、无线网络及数字传输技术等。



张中兆 (1951-), 男, 北京人, 哈尔滨工业大学教授, 主要研究方向为战术武器数据链、深空通信、集群通信、卫星移动通信等。