

基于非理想信道状态信息的高通量卫星预编码算法

窦映喆, 薛冠昌, 杨明川

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 为了抑制频率复用造成的同频干扰, 高通量卫星通信系统开始研究地面干扰抑制技术, 包括应用于反向链路的多用户检测技术和应用于前向链路的预编码技术, 建立考虑自由空间损耗、降雨衰减和波束增益等影响的前向链路模型。在非理想信道状态信息模型的基础上针对最小均方误差预编码算法进行改进, 提出一种适用于非理想信道状态信息的改进最小均方误差预编码算法。考虑的卫星预编码算法采用更加精确的具有非理想信道信息的信道模型, 将非理想信道状态信息纳入预编码算法并进行消除设计。仿真结果表明, 基于高通量卫星预编码算法在非理想信道状态信息条件下能够显著提升系统的吞吐量, 并且提高了系统的鲁棒性。

关键词: 高通量卫星; 预编码技术; 非理想信道状态信息; 最小均方误差预编码

中图分类号: TN393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023008

High-Throughput Satellite Precoding Algorithm Based on Non-Ideal Channel State Information

DOU Yingzhe, XUE Guanchang, YANG Mingchuan

School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China

Abstract: In order to suppress co-channel interference caused by frequency reuse, high-throughput satellite communication systems have begun to study ground interference suppression technologies, including multi-user detection technology applied in the reverse link and precoding technology applied in the forward link. A forward link model was established that took into account the effects of free space loss, rain attenuation, and beam gain. Based on the non-ideal channel state information model, the minimum mean square error precoding algorithm was improved, and an improved minimum mean square error precoding algorithm suitable for non-ideal channel state information was proposed. The satellite precoding algorithm considered adopted a more accurate channel model with irrational channel information, and incorporated the non-ideal channel state information into the precoding algorithm and eliminated it. The simulation results showed that the high-throughput satellite precoding algorithm could significantly improved the throughput of the system under the condition of non-ideal channel state information, and also improved the robustness of the system.

Keywords: high-throughput satellite, precoding technology, non-ideal channel state information, minimum mean square error precoding

0 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”的网络的需求, 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^[1-2]。在相同频谱资源的条件下, 高通量卫星应用多点波束技术和频率复用技术可以获得固定移动卫星数倍的通信容量^[3-4]。在最大化可用数据速率和频谱利用率的前提下, 高通量卫星采用全频率复用

收稿日期: 2022-10-19; **修回日期:** 2023-01-25

通信作者: 杨明川, mcyang@hit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.62071146, No.62171151); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No.HIT.OCEF. 2021012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62071146, No.62171151), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. HIT. OCEF. 2021012)

方案的同时带来严重的同频干扰问题,预编码技术则是应对这一问题的有效方法^[5-6]。预编码技术的原理是根据信道状态信息完成信号处理,从而实现抑制干扰、提高链路性能等目标。预编码技术一般应用于高通量卫星前向链路的下行信道^[7-8]。

预编码技术主要分为非线性预编码技术和线性预编码技术,传统非线性预编码虽然能取得较好的性能,但是由于其复杂度过高很难实际应用,例如能实现最优容量的脏纸编码^[9];而线性预编码由于其复杂度相对较低而得到了广泛关注。参考文献[11-12]首次将线性预编码中较为经典的迫零预编码算法应用于高通量卫星之中,证明了线性预编码技术能有效提升系统通信容量性能,同时研究分析了信道估计误差、反馈时延以及星上有效载荷对整体系统性能的影响^[13-14]。参考文献[15]研究了Ka频段高通量卫星系统采用正则化迫零线性预编码时的频谱利用率等性能,并在信道状态信息延迟和振荡器相位噪声的实际约束下对地面用户分群服务进行了研究。参考文献[16]在基于DVB-S2标准的高通量卫星系统中,合理应用非线性脏纸编码技术,并与迫零和正则化迫零等线性方法做对比,给出了多波束联合预编码方法的性能上限,同时验证了波束覆盖参数与系统通信容量之间的关系。参考文献[17]提出了一种预编码技术的实时演示器,用于在未来高通量卫星系统的前向链路中实现全频率复用,并证明在卫星通信中基于DVB-S2X标准附录E中定义的超帧帧结构实现预编码的可行性。高通量卫星在海洋等通信场景下具有重要的研究意义^[18-19]。参考文献[20]设计了一个采用部分信道状态信息进行矩阵和向量归一化的迫零预编码器,通过减少来自用户终端的信道状态信息反馈实现减少时延和信令开销的目的。参考文献[21]对最新的高通量卫星系统预编码技术进行了总结并指出其未来的发展方向和面临的挑战。虽然目前对于高通量卫星系统预编码技术的研究已有较大进展,但对非理想信道状态信息的研究仍有所欠缺,因此仍需进一步研究改进高通量卫星预编码技术以对抗非理想信道状态信息的影响。

由于星上硬件的局限性和预编码对时效性的较高要求,考虑各种可能存在干扰并将其纳入算法设计之中,以低复杂度的预编码算法发挥高通量卫星最大的性能并获得更高的容量始终是一个重要的研究方向^[22]。本文在建立了考虑自由空间损耗、降雨衰减和波束增益等影响的前向链路模型并采用非理想信道状态信息模型的基础上,针对经典的最小均方差低复杂度预编码算法进行改进,提出一种适用于非理想信道状态信息的改进最小均方差预编码算法,旨在将非理想信道状态信息纳入预编

码算法的设计中并将其消除,进而提升系统在非理想信道状态信息条件下的吞吐量。

1 高通量卫星通信系统模型

1.1 高通量卫星通信系统信号模型

星地混合波束成形等技术的发展带来了预编码算法复杂度的提升。为提高预编码算法的灵活性与适应性,本文研究了信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)等约束条件,也考虑到高通量卫星通信系统中由传播时延、反馈时延与处理时延共同引起的不容忽视的信道状态信息过时问题,设计针对高轨的地球静止轨道同步卫星的鲁棒性较好的预编码算法^[23]。

高通量卫星系统的前向链路通过多个波束将互相独立的信息流传输到多个固定终端。在本文所研究的单馈源每波束的单信关站场景下,一个信关站通过控制星上的 K 个馈源对采用全频率复用的 K 个邻近波束进行管理。采用全频复用的方式会带来严重的同频干扰,即在同一个时刻内,每个波束内的用户在接收到本波束信号的同时还会接收到来自其他波束区域内用户信号的干扰。系统采用时分复用方案,即每个波束在每个时隙内仅为一个用户提供服务。高通量卫星通信系统前向链路示意图1所示。

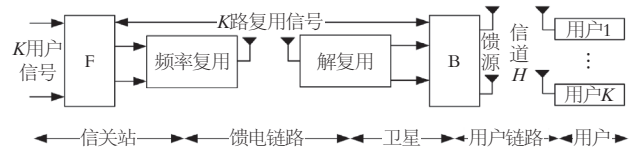


图1 高通量卫星通信系统前向链路示意

假设 s_i 表示由地面信关站发送的第 i 个用户信号,对于发送至 K 个波束区域中的任一用户信号 s_i ,其平均功率为1,即 $E[s_i^2]=1, \forall i=1,2,\dots,K$ 。设预编码向量为 $t_i=\sqrt{p_i}w_i$,其中 $p_i=\|t_i\|^2$ 是第 i 个用户的信号功率, $w_i=\frac{t_i}{\|t_i\|}$ 是归一化预编码向量。星上发送信号是所有波束信号的叠加,即 $\sum_{i=1}^K t_i s_i$,用户 i 的接收信号可以表示为

$$y_i = h_i^H t_i s_i + h_i^H \sum_{j=1, j \neq i}^K t_j s_j + n_i \quad (1)$$

其中式(1)左侧表示用户 i 的信号,右侧第一项是干扰信号, n_i 是独立同分布的零均值高斯随机噪声, $h_i=b_i d_i$ 是 $N \times 1$ 维信道矩阵,其中 b_i 表示多波束增益, d_i 表示对数随机衰减。

用户 i 接收端的信干噪比可以表示为

$$\text{SINR}_i = \frac{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{t}_i|^2}{\sum_{j \neq i} |\mathbf{h}_i^H \mathbf{t}_j|^2 + N_0 W} = \frac{p_i |\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_i|^2}{\sum_{j \neq i} p_j |\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_j|^2 + N_0 W} \quad (2)$$

其中, N_0 是噪声功率谱密度, W 是总带宽, 因此用户 i 最高可达到的香农速率为

$$r_i = W \log_2(1 + \text{SINR}_i), \quad \forall i = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

1.2 高通量卫星通信系统信道模型

对于中心频率10 GHz以上的视距卫星信道, 由于对流层的各种大气效应, 高通量卫星系统的性能与可用性将大大降低。在各种大气效应中, 降雨衰减是最关键的主导因素且在Ka频段尤为明显, 因此在建模时应着重考虑降雨衰减的影响。由于Ka频段频率较高, 电磁波的自由空间损耗过大, 为地面移动用户配置的全向天线的收发增益不足以满足链路预算, 因此Ka频段的高通量卫星系统只适合提供固定用户业务, 卫星移动业务一般由L频段的卫星提供^[24]。在相同降雨率的条件下, 降雨衰减随频率的增加而增大, 且在20 GHz附近开始快速增大。对于工作于较高频率的高通量卫星系统而言, 在对其进行建模时应着重计算降雨衰减这一因素, 因此, 本文采用20 GHz频段进行仿真研究, 在建立高通量卫星系统信道模型时同时考虑自由空间损耗、降雨衰减和波束增益3方面的影响。信道矩阵 $\mathbf{H}$ 可以表示为

$$\mathbf{H} = \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{B} \quad (4)$$

其中, $K \times K$ 维降雨衰减矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}$ 模拟了降雨衰减的影响, $K \times K$ 维多波束天线增益矩阵 $\mathbf{B}$ 模拟了卫星天线的辐射模式、接收天线增益、路径损耗和噪声功率的影响。

多波束天线增益矩阵的大小取决于天线波束辐射方向图和波束内各用户终端天线的位置, 对于提供固定用户业务的高通量卫星通信系统, 多波束天线增益矩阵是固定的, 其第 (i, j) 项 $b_{i,j}$ 可以表示为

$$b_{i,j} = \frac{\sqrt{G_{\text{R}}^i G_{i,j}}}{4\pi \frac{\sqrt{d_0^2 + d^2}}{\lambda} \sqrt{\kappa_{\text{B}} T B_{\text{W}}}} \quad (5)$$

其中, $G_{i,j}$ 是第 j 个星上馈源到第 i 个用户终端的多波束天线增益, G_{R}^i 是用户终端天线增益, κ_{B} 是玻尔兹曼常数, T 是接收机噪声温度, B_{W} 是用户链路带宽, λ 是载波波长, d_0 是卫星到地面用户终端所在波束的波束中心的距离, d 是地面用户终端到其所在波束的波束中心的距离。由于地球地面的曲率以及卫星的广域覆盖特性, 引入 d 可以更准确地描述高通量卫星系统不同波束之间自由空间损耗的差别。

第 j 个星上馈源到第 i 个用户终端的多波束天线增益 $G_{i,j}$ 主要取决于卫星发射天线辐射模式和用户位置, 可以

表示为

$$G_{i,j} = G_{\text{T}}^j \left(\frac{J_1(u_{i,j})}{2u_{i,j}} + 36 \frac{J_3(u_{i,j})}{u_{i,j}^3} \right)^2 \quad (6)$$

其中, G_{T} 是发射天线增益, 中间量 $u_{i,j} = 2.07123 \frac{\sin(\theta_{i,j})}{\sin(\theta_{i,3\text{dB}})}$, $\theta_{i,j}$ 是第 i 个用户与第 j 个波束中心相对于卫星的夹角, $\theta_{i,3\text{dB}}$ 是第 i 个波束(即用户所在波束)的3 dB波束角度, $J_1(\cdot)$ 和 $J_3(\cdot)$ 是一阶和三阶一类贝塞尔函数。

建模降雨衰减的方法采用ITU-R P.618建议书^[25]中的最新经验模型, 以dB为单位的功率增益 ξ_{dB} 服从对数正态分布, 即 $\ln(\xi_{\text{dB}}) \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其中 μ 和 σ^2 为对应正态分布的均值和方差, 其与接收机位置、运行频率、极化、卫星仰角有关。因此降雨衰减矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}$ 可以表示为 $\tilde{\mathbf{H}} = \text{diag}\{\sqrt{\xi_1} \mathbf{e}^{-j\phi_1}, \dots, \sqrt{\xi_K} \mathbf{e}^{-j\phi_K}\}$, 其中 $\sqrt{\xi_k} \mathbf{e}^{-j\phi_k}$ 为第 k 个用户的降雨衰减因子。由于卫星多波束天线馈源间距远小于信号传播距离, 因此假设不同波束与同一个用户间的降雨衰落因子相同, ϕ 服从均匀分布的相位, 即 $\phi \sim U(0, 2\pi)$ 。

1.3 高通量卫星通信系统非理想信道状态信息模型

对高通量卫星通信系统进行详尽细致的建模是后续对预编码技术研究的基础, 但实际的通信环境可能是复杂多变的, 其中的一些干扰可能是无法准确预测的, 因此完全准确无误的信道状态信息只存在于理想情况下, 而对高通量卫星通信系统信道模型的研究要考虑这些非理想的情况。由于信道状态信息估计不准确引入的估计误差、有限反馈带来的量化误差以及信道反馈时延造成的时延误差等因素的影响, 网关处得到的信道状态信息通常是不完全已知和部分可用的, 称为非理想信道状态信息。对非理想信道状态信息的研究是提高高通量卫星系统建模准确度和完善预编码算法不可或缺的一步。

对非理想信道状态信息的描述通常有两种模型可以采用, 即随机模型(统计模型)和确定性模型(最坏情况模型), 用以研究在统计平均或最差信道下的系统模型。随机模型通常认为高通量卫星信道是一个复随机矩阵, 并从统计层面对信道特性进行描述, 一般统计上认为其具有已知关键参数的正态分布元素。本文将主要采用随机模型对高通量卫星系统非理想信道状态信息问题进行建模与分析。

2 适用于非理想信道状态信息的改进MMSE预编码

2.1 MMSE预编码算法

最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)

预编码算法的核心思想是最小化发射信号与接收信号之间的均方误差,这种思想用数学表达式可以描述为

$$\mathbf{W} = \min_{\mathbf{W}} E \left\{ \left\| \mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{s} + \mathbf{n} - \mathbf{s} \right\|^2 \right\} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \text{trace}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H) \leq P_t$$

为进行求解,建立式(7)的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(\mathbf{W}, \lambda) &= E \left\{ \left\| \mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{s} + \mathbf{n} - \mathbf{s} \right\|^2 \right\} + \lambda \left[\text{trace}(\mathbf{W}^H \mathbf{W}) - P_t \right] \\ &= \text{trace}(\mathbf{W}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{W}) - \text{trace}(\mathbf{W}^H \mathbf{H}^H) \\ &\quad - \text{trace}(\mathbf{H} \mathbf{W}) + 2K + \lambda \left[\text{trace}(\mathbf{W}^H \mathbf{W}) - P_t \right] \end{aligned} \quad (8)$$

使关于复矩阵变量共轭的导数为0,可得

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{W}^*} = \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{W} - \mathbf{H}^H + \lambda \mathbf{W} = 0 \quad (9)$$

由式(9)可得

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \lambda \mathbf{I}_K)^{-1} \mathbf{H}^H \quad (10)$$

对于高通量卫星通信系统,式(10)的 λ 一般取 $\lambda = \frac{N_0 W}{P_t}$,

功率控制因子一般取 $\beta_{\text{MMSE}} = \sqrt{\frac{P_t}{\text{trace}(\mathbf{W}_{\text{MMSE}} \mathbf{W}_{\text{MMSE}}^H)}}$ 。当

系数 λ 满足 $\lambda \rightarrow \infty$ 时,式(10)的表达形式与匹配滤波预编码算法类似;当系数 λ 满足 $\lambda \rightarrow 0$ 时,式(10)的表达形式与迫零预编码算法类似。换言之在低信噪比或高信噪比的条件下,这一算法各自可以视为匹配滤波预编码算法或迫零预编码算法。此外,MMSE预编码算法虽在设计之初就考虑加性噪声干扰的影响并设法将其消除,但其仍无法完全消除加性噪声干扰的影响,更多地可以视为一种折中的方法。

2.2 改进MMSE预编码算法

在高通量卫星通信系统中实际的通信环境可能是复杂多变的,其中一些干扰可能是无法准确预测的,完全准确无误的信道状态信息只存在于理想情况下,而有误差的信道状态信息显然会影响系统性能,因此在非理想信道状态信息的条件下对预编码算法进行改进很有必要。本文将最小均方误差预编码算法为基础对适用于非理想信道状态信息的改进预编码算法进行研究。

在对非理想信道状态信息的描述上采用统计模型,高通量卫星通信系统非理想信道状态条件下的信道矩阵 $\mathbf{H}_e$ 可以认为由两个部分求和获得,即

$$\mathbf{H}_e = \mathbf{H} + \mathbf{E} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{H}$ 表示网关处所估计的信道矩阵,对应式(4)中的 $\mathbf{H}$, $\mathbf{E}$ 是高通量卫星估计误差矩阵, $\mathbf{E}$ 中的每一项都是独立同分布的且服从 $N_c(0, \sigma_e^2)$ 分布,误差矩阵 $\mathbf{E}$ 、发射信

号 $\mathbf{s}$ 和噪声 $\mathbf{n}$ 之间是相互独立的。

基于式(11)所描述的信道矩阵 $\mathbf{H}_e$ 对最小均方误差预编码算法进行改进,首先需要用数学语言将式(7)改写为

$$\mathbf{W} = \min_{\mathbf{W}} E \left\{ \left\| \tilde{\mathbf{s}} - \mathbf{s} \right\|^2 \right\} \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \text{trace}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H) \leq P_t$$

其中, $\mathbf{s}$ 为功率归一化后的发射信号, $\tilde{\mathbf{s}}$ 是接收端接收到的信号,其根据高通量卫星通信系统信号模型可以用 $\mathbf{y} = \mathbf{H}_e \mathbf{W} \mathbf{s} + \mathbf{n}$ 表示为

$$\tilde{\mathbf{s}} = \beta^{-1} \mathbf{y} = \beta^{-1} \mathbf{H}_e \mathbf{W} \mathbf{s} + \beta^{-1} \mathbf{n} \quad (13)$$

根据统计学中的 $E(X^2) = D(X) + [E(X)]^2$,可知对于服从 $N(0, \sigma_n^2)$ 的噪声 $\mathbf{n}$ 有 $E(\mathbf{n}^2) = \sigma_n^2$,将式(13)代入式(12)可得

$$E \left\{ \left\| \tilde{\mathbf{s}} - \mathbf{s} \right\|^2 \right\} = E \left\{ \left\| \beta^{-1} \mathbf{H}_e \mathbf{W} \mathbf{s} + \beta^{-1} \mathbf{n} - \mathbf{s} \right\|^2 \right\} \quad (14)$$

$$= E \left\{ \left\| \beta^{-1} (\mathbf{H} + \mathbf{E}) \mathbf{W} - \mathbf{I} \right\|^2 \right\} + \sigma_n^2 \beta^{-2}$$

根据矩阵的迹的性质 $\text{trace}(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = \text{trace}(\mathbf{A}) + \text{trace}(\mathbf{B})$ 及一些学者已进行过的推导^[26],式(14)中的

$E \left\{ \left\| \beta^{-1} (\mathbf{H} + \mathbf{E}) \mathbf{W} - \mathbf{I} \right\|^2 \right\}$ 可以表示为

$$E \left\{ \left\| \beta^{-1} (\mathbf{H} + \mathbf{E}) \mathbf{W} - \mathbf{I} \right\|^2 \right\} = E \left\{ \left\| \beta^{-1} \mathbf{H} \mathbf{W} - \mathbf{I} \right\|^2 \right\} + E \left\{ \left\| \beta^{-1} \mathbf{E} \mathbf{W} \right\|^2 \right\} \quad (15)$$

根据共轭转置的性质 $(\mathbf{AB})^H = \mathbf{B}^H \mathbf{A}^H$ 和 $(\mathbf{A} + \mathbf{B})^H = \mathbf{A}^H + \mathbf{B}^H$ 以及矩阵的迹的性质 $\text{trace}(\mathbf{A}) + \text{trace}(\mathbf{A}^H) = 2\text{Re}[\text{trace}(\mathbf{A})]$,式

(15)中 $E \left\{ \left\| \beta^{-1} \mathbf{H} \mathbf{W} - \mathbf{I} \right\|^2 \right\}$ 可简化为

$$\begin{aligned} &E \left\{ \left\| \beta^{-1} \mathbf{H} \mathbf{W} - \mathbf{I} \right\|^2 \right\} \\ &= E \left\{ \text{trace} \left[(\beta^{-1} \mathbf{H} \mathbf{W} - \mathbf{I})^H (\beta^{-1} \mathbf{H} \mathbf{W} - \mathbf{I}) \right] \right\} \\ &= \beta^{-2} \left\| \mathbf{H} \mathbf{W} \right\|^2 - 2\beta^{-1} \text{Re}[\text{trace}(\mathbf{H} \mathbf{W})] + K \end{aligned} \quad (16)$$

根据矩阵的迹的性质 $\text{trace}(k\mathbf{A}) = k \cdot \text{trace}(\mathbf{A})$ 和信道的估计误差矩阵 $\mathbf{E}$ 的性质 $E\{\mathbf{E}^H \mathbf{E}\} = 2\sigma_e^2$,式(15)中的 $E \left\{ \left\| \beta^{-1} \mathbf{E} \mathbf{W} \right\|^2 \right\}$ 可以简化为

$$\begin{aligned} &E \left\{ \left\| \beta^{-1} \mathbf{E} \mathbf{W} \right\|^2 \right\} \\ &= E \left\{ \text{trace} \left[(\beta^{-1} \mathbf{E} \mathbf{W})^H (\beta^{-1} \mathbf{E} \mathbf{W}) \right] \right\} \\ &= \beta^{-2} K (2\sigma_e^2) P_t \end{aligned} \quad (17)$$

根据式(14)~式(17),式(12)中的 $E \left\{ \left\| \tilde{\mathbf{s}} - \mathbf{s} \right\|^2 \right\}$ 可以表示为

$$\begin{aligned} E \left\{ \left\| \tilde{\mathbf{s}} - \mathbf{s} \right\|^2 \right\} &= \beta^{-2} \sigma_n^2 + \beta^{-2} \left\| \mathbf{H} \mathbf{W} \right\|^2 \\ &\quad - 2\beta^{-1} \text{Re}[\text{trace}(\mathbf{H} \mathbf{W})] \\ &\quad + K + 2K\beta^{-2} \sigma_e^2 P_t \end{aligned} \quad (18)$$

为进行求解,建立式(18)的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned}
L &= E \left\{ \left\| \tilde{\mathbf{s}} - \mathbf{s} \right\|^2 \right\} + \lambda \left[\text{trace}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H) - P_t \right] \\
&= \beta^{-2} \sigma_n^2 + \beta^{-2} \left\| \mathbf{H}\mathbf{W} \right\|^2 - 2\beta^{-1} \text{Re} \left[\text{trace}(\mathbf{H}\mathbf{W}) \right] \\
&\quad + K + 2K\beta^{-2} \sigma_e^2 P_t + \lambda \text{trace}(\mathbf{W}\mathbf{W}^H) - \lambda P_t
\end{aligned} \quad (19)$$

令 L 关于复矩阵变量共轭的导数为0, 可得

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial \mathbf{W}^*} &= \beta^{-2} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{W} - \beta^{-1} \mathbf{H}^H + \lambda \mathbf{W} = 0 \\
\frac{\partial L}{\partial \beta} &= -2\beta^{-3} \sigma_n^2 - 2\beta^{-3} \left\| \mathbf{H}\mathbf{W} \right\|^2 \\
&\quad + 2\beta^{-2} \text{Re} \left[\text{trace}(\mathbf{H}\mathbf{W}) \right] - 4K\beta^{-3} \sigma_e^2 P_t = 0
\end{aligned} \quad (20)$$

解式(20)可得

$$(\beta^{-2} \mathbf{H}^H \mathbf{H} + \lambda \mathbf{I}) \mathbf{W} = \beta^{-1} \mathbf{H}^H \quad (21)$$

$$\beta \text{Re} \left[\text{trace}(\mathbf{H}\mathbf{W}) \right] - \left\| \mathbf{H}\mathbf{W} \right\|^2 = \sigma_n^2 + 2K\sigma_e^2 P_t \quad (22)$$

将式(21)化简可得 $\mathbf{W}$ 的表达式为

$$\mathbf{W} = \beta (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \beta^2 \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (23)$$

根据矩阵共轭转置的性质 $(\mathbf{A}^H)^{-1} = (\mathbf{A}^{-1})^H$ 、 $(\mathbf{A}\mathbf{B})^H = \mathbf{B}^H \mathbf{A}^H$ 和 $(\mathbf{A} + \mathbf{B})^H = \mathbf{A}^H + \mathbf{B}^H$, 可证 $(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \beta^2 \lambda \mathbf{I})^{-1}$ 的共轭转置等于其本身, 证明过程为

$$\begin{aligned}
\left[(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \beta^2 \lambda \mathbf{I})^{-1} \right]^H &= \left[(\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \beta^2 \lambda \mathbf{I})^H \right]^{-1} \\
&= (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \beta^2 \lambda \mathbf{I})^{-1}
\end{aligned} \quad (24)$$

基于式(24)的结论, 并根据矩阵的迹的性质 $\text{trace}(\mathbf{A}\mathbf{B}) = \text{trace}(\mathbf{B}\mathbf{A})$ 以及复矩阵的共轭转置与自身的乘积不含虚部的特性, 将式(23)代入式(22)的左侧进一步化简可得

$$\begin{aligned}
&\beta \text{Re} \left[\text{trace}(\mathbf{H}\mathbf{W}) \right] - \left\| \mathbf{H}\mathbf{W} \right\|^2 \\
&= \lambda \beta^2 \text{trace}(\mathbf{W}^H \mathbf{W}) \\
&= \lambda \beta^2 P_t
\end{aligned} \quad (25)$$

将式(25)代入式(22)可得

$$\lambda \beta^2 P_t = \sigma_n^2 + 2K\sigma_e^2 P_t \quad (26)$$

将式(26)化简为 $\lambda \beta^2 = \frac{\sigma_n^2}{P_t} + 2K\sigma_e^2$, 代入式(23)可得

$$\mathbf{W} = \beta \left[\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \left(\frac{\sigma_n^2}{P_t} + 2K\sigma_e^2 \right) \mathbf{I} \right]^{-1} \mathbf{H}^H \quad (27)$$

式(27)即为适用于非理想CSI的优化最小均方误差预编码矩阵, 其对比式(10)的最小均方误差预编码算法增加了 $2K\sigma_e^2$ 项。

3 仿真验证与分析

为验证本文所述的几种预编码算法性能而进行仿真分析, 其中前向链路信道模型的仿真参数设置见表1。由于高通量卫星最大的特点便是其较高的吞吐量, 因此本

文的仿真中采用吞吐量来描述高通量卫星系统的性能, 第 i 个波束的吞吐量可以用信干噪比表示为

$$C_i = W \log_2(1 + \text{SINR}_i) \quad (28)$$

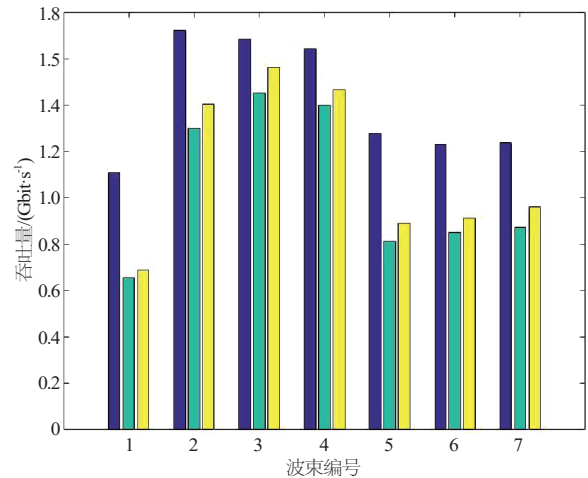
其中, SINR_i 是用户 i 接收端的信干噪比。

表1 仿真参数设置

参数	参数值
载波频率/Hz	20
轨道高度/km	35 786
波束半径/km	190
波束3 dB角度/(°)	0.4
降雨衰减均值/dB	0.6
最大天线发射增益/dBi	50
降雨衰减方差/dB	1
用户终端接收增益/dBi	41.7
用户链路带宽/MHz	500
接收机噪声温度/K	207
前向链路自由空间损耗/dB	210
最大发射功率/W	80

图2是有无非理想信道状态信息影响时不同预编码算法各波束吞吐量性能之间的对比, 两种场景分别对应 $\sigma=0$ 与 $\sigma=0.03$, 可以看到相较于理想条件, 非理想信道状态信息条件下MMSE预编码算法的吞吐量性能会受到一定影响。在这种情况下, 适用于非理想信道状态信息的改进MMSE预编码算法对每波束吞吐量性能的改善较为明显, 证明了本文推导算法的正确性与实用性。

图3和图4是功率与非理想信道状态信息之间关系的



图注: ■ MMSE预编码-理想CSI ■ MMSE预编码-非理想CSI ■ 适用于非理想CSI的改进MMSE-非理想CSI

图2 有无非理想信道状态信息影响时不同预编码算法各波束吞吐量性能

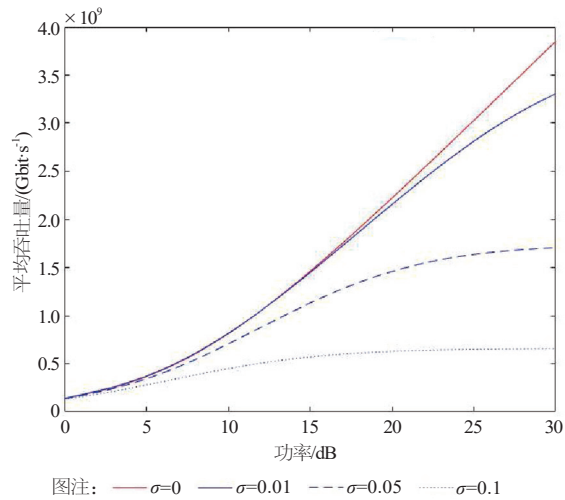


图3 不同 σ 取值时7波束MMSE预编码的平均吞吐量与功率的关系

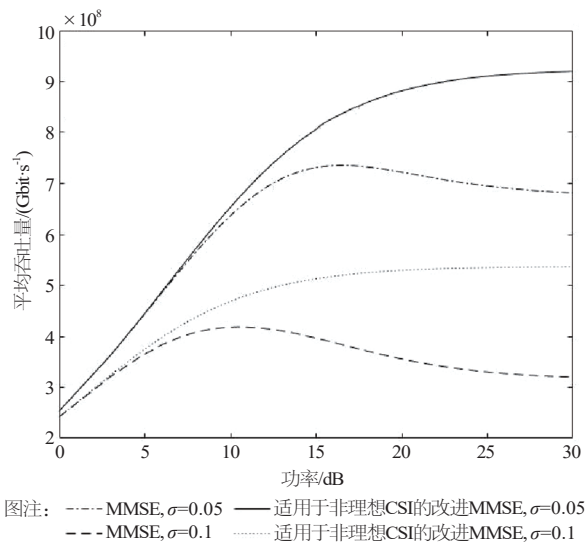


图4 不同 σ 取值时19波束MMSE预编码的平均吞吐量与功率的关系

仿真对比，其中图3是不同 σ 取值时7波束MMSE预编码的平均吞吐量与功率的关系，图4是不同 σ 取值时19波束MMSE预编码的平均吞吐量与功率的关系。可以看到7波束时随 σ 的增大系统性能逐渐恶化。当 $\sigma=0.1$ 时增大功率已几乎无法改善系统性能，而当波束数目与 σ 值进一步增大时，功率的增大对采用MMSE预编码的系统性能甚至是负收益的，这说明对抗非理想信道状态信息不能靠功率的增加而要靠预编码算法的改进。相比而言适用于非理想信道状态信息的改进MMSE预编码算法则对系统性能有较为明显的提升，这从另一角度证明了该算法在非理想信道状态信息条件下的优势。

参考文献：

- [1] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A. Clustering strategies for multicast precoding in multibeam satellite systems[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2020, 38(2): 85-104.
- [2] 张秋旋, 张海波, 王艳, 等. 高通量卫星通信综述[J]. 中国新通信, 2022, 24(4): 35-37.
ZHANG Q X, ZHANG H B, WANG Y, et al. Overview of high-throughput satellite communication[J]. China New Telecommunications, 2022, 24(4): 35-37.
- [3] 马晨. 高通量卫星系统预编码理论与技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
MA C. Research on precoding theories and techniques of high throughput satellite system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [4] HONNAIAH P J, LAGUNAS E, CHATZINOTAS S, et al. Interference-aware demand-based user scheduling in precoded high throughput satellite systems[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 3: 120-137.
- [5] GHARANJIK A, BHAVANI S M R, ARAPOGLOU P D, et al. Robust precoding design for multibeam downlink satellite channel with phase uncertainty[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2015: 3083-3087.
- [6] MYSORE B S, LAGUNAS E, CHATZINOTAS S, et al. Precoding for satellite communications: why, how and what next? [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(8): 2453-2457.
- [7] ROCHA A, MOTA S, JORGE F. Propagation campaign at q-band and ka-band using the Alphasat and Ka-Sat satellites[C]//Proceedings of 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). Institution of Engineering and Technology, 2018.
- [8] 韩星, 张华冲, 杨松. 基于ASIC的海五卫星信号接收技术及实现[J]. 无线电工程, 2018, 48(10): 896-899.
HAN X, ZHANG H C, YANG S. Design and implementation of inmarsat-5 signal receiving technique based on ASIC[J]. Radio Engineering, 2018, 48(10): 896-899.
- [9] 高鑫, 门吉卓, 刘晓滨, 等. 高通量卫星通信发展现状与应用探索[J]. 卫星应用, 2020(8): 43-48.
GAO X, MEN J Z, LIU X B, et al. Development status and application exploration of high-throughput satellite communication [J]. Satellite Application, 2020(8): 43-48.
- [10] KANG J, KWON D S, LEE C. Performance optimization of tomlinson-harashima precoder with tilted constellation[J]. IEEE

- Communications Letters, 2010, 14(10): 909-911.
- [11] LEE B, SHIM B. A vector perturbation with virtual users for multiuser MIMO downlink[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2010: 3406-3409.
- [12] COSTA M. Writing on dirty paper (Corresp.)[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(3): 439-441.
- [13] COTTATELLUCCI L, DEBBAH M, GALLINARO G, et al. Interference mitigation techniques for broadband satellite systems[C]//Proceedings of 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Reston: AIAA, 2006.
- [14] DEVILLERS B, PEREZ-NEIRA A, MOSQUERA C. Joint linear precoding and beamforming for the forward link of multi-beam broadband satellite systems[C]//Proceedings of 2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [15] 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 and Networking, 2014, 32(4): 291-308.
- [16] GHARANJIK A, BHAVANI S M R, ARAPOGLOU P D, et al. Precoding design and user selection for multibeam satellite channels[C]//Proceedings of 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2015: 420-424.
- [17] JOROUGH V, VÁZQUEZ M Á, PÉREZ-NEIRA A I. Generalized multicast multibeam precoding for satellite communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(2): 952-966.
- [18] 韩磊. 海洋宽带卫星通信在高通量卫星时代的商业机遇[J]. 军民两用技术与产品, 2019(5): 22-26.
- HAN L. Commercial opportunity of broadband ocean satellite communication in the era of high-throughput satellite[J]. Dual Use Technologies & Products, 2019(5): 22-26.
- [19] DIAZ M A, COURVILLE N, MOSQUERA C, et al. Non-linear interference mitigation for broadband multimedia satellite systems[C]//Proceedings of 2007 International Workshop on Satellite and Space Communications. Piscataway: IEEE Press, 2007: 61-65.
- [20] MATURO N, DUNCAN J C M, KRIVCHIZA J, et al. Demonstrator of precoding technique for a multi-beams satellite system[C]//Proceedings of 2019 8th International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications (TTC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-8.
- [21] MYSORE B S, LAGUNAS E, CHATZINOTAS S, et al. Precoding for satellite communications: why, how and what next? [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(8): 2453-2457.
- [22] SU B, ZHOU Q R. Analysis of dynamic evolution and station-keeping of starlink[C]//Proceedings of 2021 China Automation Congress (CAC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 8229-8234.
- [23] KHAN M H A, CHO K M, LEE M H, et al. A simple block diagonal precoding for multi-user MIMO broadcast channels[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014: 95.
- [24] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A. Design trade-off analysis of precoding multi-beam satellite communication systems[C]//Proceedings of 2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-12.
- [25] ITU-R Recommendation P.618-10. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems[Z]. 2009.
- [26] WANG J H, PALOMAR D P. Robust MMSE precoding in MIMO channels with pre-fixed receivers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(11): 5802-5818.

作者简介



窦映喆 (1998-), 男, 哈尔滨工业大学硕士生, 主要研究方向为星地融合网络、高通量卫星预编码、同频干扰消除。



薛冠昌 (1998-), 男, 哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为卫星通信、星地一体化网络技术。



杨明川 (1977-), 男, 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为卫星移动通信系统、高空平台站通信系统、深空通信及空天地一体化信息网络。