

空间信息网络中毫米波 MIMO 通信系统关键技术

马新迎, 陈智, 马斯, 方俊

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

摘 要: 随着空间信息网络的迅速发展及人类活动的增加, 移动卫星与地球站之间的通信质量要求越来越高。为了满足高速率、大容量、宽带实时通信的需求, 毫米波频段应用于移动卫星通信系统引起极大关注。通过对毫米波多输入多输出 (MIMO) 系统中波束赋形、捕获跟踪及信道估计等关键技术的介绍, 能够全面了解未来空间信息网络将要面临的挑战。

关键词: 空间信息网络; 波束赋形; 捕获跟踪; 信道估计

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

The key technologies of millimeter wave MIMO communication system in space information network

MA Xin-ying, CHEN Zhi, MA Si, FANG Jun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: With the rapid development of space information network and the increasing expansion of mankind activity, the requirements of communication quality become higher between mobile satellites and earth stations. In order to meet the demands of high data rate, large capacity and broadband real-time communication, applying millimeter wave frequency band to mobile satellite communication system has attracted great attention. Beamforming, tracking and channel estimation were introduced in millimeter wave MIMO system to fully understand the challenges of space information network which will face in the future.

Key words: space information network, beamforming, tracking, channel estimation

1 引言

空间信息网络是以空间平台为载体, 实时获取、传输和处理空间信息的网络系统。空间信息网络通过组网互联, 实时采集、传输和处理海量数据, 实现卫星遥感、卫星导航和卫星通信的一体化集成应用与协同服务^[1]。空间信息网络通过组网互联, 实时采集、处理、传输数据, 不仅能为环境监测、远洋航行、航空运输、应急救援等重大应用提供服务, 同时, 向下可提供地面移动宽带通信服务, 支持对地观测的高动态、宽带实时数据传输, 向上为航天器测控, 导航提供服务, 支持深空探测的超远程、大时延可靠传输。为了实现空间信息网络高速

率、大容量通信的要求, 空间信息网络的空间平台载体 (同步卫星或中、低轨道卫星、平流层充氮飞艇或气球、各类航空航天飞行器等) 与地面信号接收机都需要使用毫米波多输入多输出 (MIMO) 多天线系统。近年来, 随着多媒体应用业务的不断发展, 无线数据流量显著增加, 现有的低频无线通信带宽已不能满足人们的通信需求, 为了提高通信容量、适应无线通信日益增长的传输速率需求, 避免信道拥挤和相互干扰, 通信频率必须向更高的频段发展。毫米波通信是未来空间信息网络中可实现超高速通信非常有前途的一项技术。毫米波频段是指 30~300 GHz 的频率, 拥有丰富的频谱资源, 利用毫米波频段中的大带宽, 它甚至具有提供每秒千兆

收稿日期: 2017-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61370012)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61370012)

比特速率的潜力。毫米波通信具有通信容量大、保密性好、传输质量高等优点^[2]，且毫米波频段波长很短，使多天线系统易于集成，这极大加快了毫米波通信技术的发展速度，毫米波领域已经逐渐成为空间信息网络领域研究、开发和利用的一个极其活跃的领域。

毫米波通信拥有很多优点，但也存在一定的局限性。首先，在如此高的频段中进行通信将会引起很大的信号衰减和吸收，为了补偿严重的路径损耗，信号发送端或信号接收端需要使用 MIMO 多天线技术以提供天线阵列增益。特别是采用波束赋形技术，利用波束控制提高传输的定向性，降低不同传输方向上信号之间的干扰从而增加链路增益。其次，精确的波束赋形预编码矩阵需要完整的信道状态信息，故对毫米波系统进行精确的信道估计显得尤为重要。但这对于具有大规模天线和低信噪比的毫米波通信系统是一个巨大挑战，特别是在多用户 MIMO 这种情况下，信道估计的精确度会受到更加严重的影响。此外，由于信号发送端与信号接收端都在不断地移动，而毫米波的方向性比较强，很容易造成通信链路中断。所以，为了保障空间信息网络的实时高速通信，信号收发端天线阵列的跟踪对准也是一个重要的研究课题。

2 波束赋形

毫米波通信是保证未来空间信息网络中实现高速无线通信的关键技术。目前，硬件的发展也让更多的无线通信领域采用户外毫米波通信^[3]。然而，使用高频段的毫米波进行通信将会引起很高的信号衰减和吸收，为了补偿严重的路径损耗，移动卫星和地球站都需要使用大规模的天线阵列，利用波束赋形增加链路增益。精确的波束赋形需要预编码器来实现，目前波束赋形系统中所使用的预编码器有以下几种：模拟预编码器、数字预编码器及模拟

数字相结合的混合预编码器。由于在数字预编码器中每个天线单元对应一个射频链路，在大规模天线阵列情况下射频链路较多，硬件复杂度和成本都太高，不利于实际应用，所以，本文主要介绍实际应用较广的模拟预编码器和混合预编码器。

2.1 模拟预编码器

在毫米波系统中，模拟预编码器是 MIMO 多天线结构中最简单的一种方式，如图 1 所示。由于数字预编码器硬件受到限制，这使模拟预编码器具有很大的吸引力。虽然模拟预编码器结构简单且造价成本低，但其性能也相对较差。

在信号发送端和信号接收端都采用模拟预编码器，并且模拟预编码器一般通过受控的相移器来实现。在这种配置下，几个天线单元通过相移器连接到单个的射频链路上，这样在很大程度上减少射频链路的数量。对于相控阵列的模拟预编码器，其性能由 2 个因素所限制：量化的相移器和量化的幅度信息。射频链路中的相移器大致分为有源和无源。在实际场景中由于有源相移器存在损耗、噪声及非线性等缺陷，有源相移器的性能将有一定的下降。虽然无源相移器功耗低且不存在非线性失真，但它们会引发较大的插入损耗。相移器的功耗同样取决于其量化相位的分辨率。模拟波束赋形方案也得到户内毫米波通信标准 IEEE 802.11ad^[4]和 wirelessHD^[5]的认可。对于 MIMO-OFDM 系统而言，基于 post-IFFT 和 pre-FFT 的模拟波束赋形可用于实现不同的准则，如容量最大化、信噪比最大化等。在毫米波 MIMO 多天线系统中，采用单个模拟预编码器只能支持单用户和单数据流的传输，而不能实现多数据流或多用户信息的传输，所以模拟波束赋形在实际场景中仍然有一定局限性。

2.2 混合预编码器

混合预编码在毫米波通信系统的性能和硬件复杂度之间进行折中，通过对混合预编码器的合理

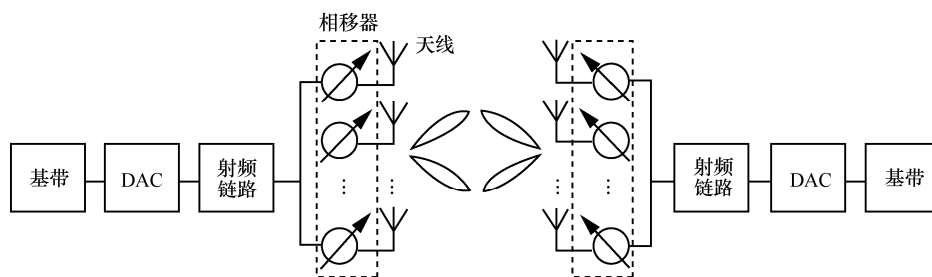


图 1 模拟预编码器结构

配置，能够达到接近全数字预编码器的性能，而复杂度和成本也不会太高。混合预编码器结构如图 2 所示。混合预编码的处理过程分别在模拟域和数字域。混合预编码器要求射频链路的数量远小于天线个数^[6-8]。下面将简单介绍混合预编码器用于单用户毫米波系统和多用户毫米波系统的情况。假设信道为平坦衰落且完美同步，一个符号周期接收到的离散时间模型信号为

$$y = \sqrt{\rho} \mathbf{W}^* \mathbf{H} \mathbf{F} \mathbf{s} + \mathbf{W}^* \mathbf{n} \quad (1)$$

其中， \mathbf{s} 表示发送端数据向量， ρ 表示每个符号的平均发射功率， $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 是服从分布 $\mathcal{N}(0, \sigma_n^2)$ 的高斯白噪声向量， $\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}$ 是由射频链路预编码器 $\mathbf{F}_{\text{RF}} \in \mathbb{C}^{N_t \times L_t}$ 和基带预编码器 $\mathbf{F}_{\text{BB}} \in \mathbb{C}^{L_t \times N_s}$ 组成。同样地，混合组合器 $\mathbf{W} = \mathbf{W}_{\text{RF}} \mathbf{W}_{\text{BB}}$ 是由射频接合器 $\mathbf{W}_{\text{RF}} \in \mathbb{C}^{N_r \times L_r}$ 和基带组合器 $\mathbf{W}_{\text{BB}} \in \mathbb{C}^{L_r \times N_s}$ 组成。对于射频链路波束赋形平台，预编码矩阵 \mathbf{F}_{RF} 和组合矩阵 \mathbf{W}_{RF} 受到硬件结构的特定约束。

预编码器和组合器都要求使用数字基带的处理过程和采用带有模拟相移器的射频链路。在文献[6]中没有考虑信道特征，模拟和数字相结合的混合预编码器同时使用了空间分集和复用系统。目前也有利用毫米波信道的特征设计用于毫米波系统的预编码器，这样能够很大程度上降低复杂度。对于混合预编码，通常采用的方式是互信息最大化，则其能够表示为

$$I(\rho, \mathbf{F}_{\text{RF}}, \mathbf{F}_{\text{BB}}, \mathbf{W}_{\text{RF}}, \mathbf{W}_{\text{BB}}) = \text{lb} \left| \mathbf{I} + \rho \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{W}^* \mathbf{H} \mathbf{F} \mathbf{F}^* \mathbf{H}^* \mathbf{W} \right| \quad (2)$$

其中， $\mathbf{R}_n = \mathbf{W}^* \mathbf{W}$ 。由于存在约束集合，不容易对式(2)直接进行优化。在文献[9]中，假设信号接收机很好译码，忽略接收机的混合约束条件，那么可以有效地移除与 \mathbf{W} 有关的项。通过估计出无约束的最优预编码器 \mathbf{F}_{opt} ，再利用信道奇异值分解方法找到混合预编码器

$$\begin{aligned} (\mathbf{F}_{\text{RF}}^{\text{opt}}, \mathbf{F}_{\text{BB}}^{\text{opt}}) &= \arg \min_{\mathbf{F}_{\text{BB}}, \mathbf{F}_{\text{RF}}} \left\| \mathbf{F}_{\text{opt}} - \mathbf{F}_{\text{BB}} \mathbf{F}_{\text{RF}} \right\|_F \\ \text{s.t. } \mathbf{F}_{\text{RF}} &\in \mathcal{F}_{\text{RF}} \\ \left\| \mathbf{F}_{\text{BB}} \mathbf{F}_{\text{RF}} \right\|_F^2 &= N_s \end{aligned} \quad (3)$$

其中， \mathcal{F}_{RF} 是可行的射频链路预编码器的集合。射频链路预编码器与基于相移器的混合预编码器结构相关，如包含常量的 $N_t \times N_{\text{RF}}$ 矩阵集合。为了解决式(3)优化问题，文献[9]提出一种正交匹配追踪算法。该算法接近无约束的数字预编码器解决方法，并且相比单数据流模拟波束赋形能够获得更大的增益。文献[9]考虑一种基于码本的方法并给出了高效的预编码器与组合器的选择方案。基于字典方法的混合预编码器设计能够转化为一种基于子矩阵的结构设计问题^[10]，这种方案充分利用信道的稀疏性来找到接近最优的预编码器。

在毫米波系统中，多用户预编码也是研究的活跃领域^[11]。大部分多用户预编码方案的基本思想是分配不同的模拟波束给不同的用户，然后利用基带数字处理进一步减少用户间干扰。在文献[12]中提出一种两级混合预编码算法，该算法信号发送端采用混合预编码结构而信号接收端采用模拟预编码结构。在第一级结构中，通过模拟预编码器和组合器使每个用户的功率最大化。在第二级结构中，信号接收端利用信道状态信息来设计基带预编码器。与全数字方案相比，两级混合预编码算法能够实现接近最优的性能，而复杂度却远低于全数字预编码结构。因此，混合预编码器在毫米波 MIMO 通信系统中将起到很重要的作用。

3 MIMO 多天线捕获跟踪

空间信息网络能够克服地面网络覆盖范围不足的局限，可为全球任意位置的用户提供安全、可靠的通信和数据传输服务。天线的跟踪对准技术广泛应用于移动卫星通信，传统的收发天线主要有抛

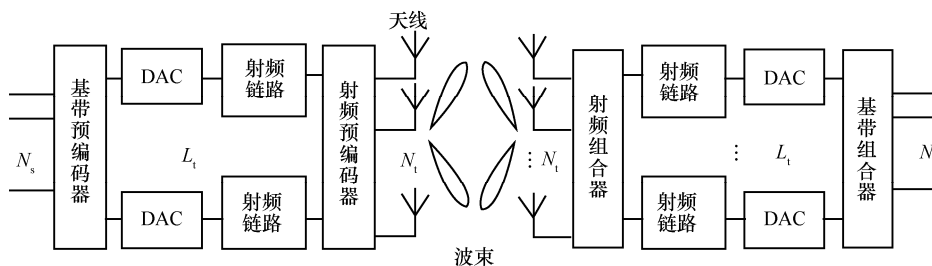


图2 混合预编码器结构

物面天线、平板天线和微带天线 3 种, 其满足不了当代或未来所要求的实时、高速、大容量的通信, 所以通信卫星和地球站都需要使用毫米波 MIMO 多天线技术进行通信。由于毫米波直线性比较强, 通信卫星和地球站在移动过程中很容易产生通信中断。因此, 通信卫星和地球站大规模天线阵列的跟踪对准是一个值得研究的重要课题。

3.1 传统天线跟踪技术

天线自动跟踪系统以卫星跟踪信号作为系统的反馈信号, 通过跟踪技术使天线快速、准确地指向目标卫星。传统天线阵列常用的自动跟踪技术有程序跟踪、步进跟踪、圆锥扫描跟踪和单脉冲跟踪技术。文献[13]对这 4 种自动跟踪技术的原理作了详细介绍, 它们各自也都存在一些优缺点。程序跟踪适合于对卫星的初始捕获, 因为它跟踪速度较快, 系统实现简单。但其完全依赖于 GPS 和惯性导航系统提供的数据实现天线对卫星的跟踪, 因而跟踪精度较低, 且需要补偿长期工作中出现的漂移。步进跟踪天线波束不能停留在对准星体的方向上, 而是在该方向的周围不断地摆动, 因而跟踪精度不高, 跟踪速度也不快, 但它设备简单, 价格低廉, 常用于地面站同步卫星通信系统。圆锥扫描跟踪实现简单, 造价低, 但跟踪精度和速度低。单脉冲跟踪的速度和精度优于步进跟踪和圆锥扫描跟踪, 但它的馈源网络复杂, 需要经常校相, 设备成本很高, 不适合于普通站, 且一旦出现故障, 维修十分困难。根据不同的实际应用场景的需求, 在上述传统天线跟踪技术的基础上, 衍生出其他跟踪方式。文献[14]提出了在测控飞机上单脉冲跟踪与程序跟踪 2 种方法结合使用, 以满足测控飞机对高跟踪精度和需要极化跟踪的要求, 首先, 针对卫星的初始捕获通过程序跟踪方法来实现, 在初始捕获结束后转入单脉冲自跟踪工作方式以获得高跟踪精度。文献[15]提出了程序跟踪与最大能量信号比较的方法相结合的跟踪方式, 来达到跟踪海事通信卫星的目的。整个卫星跟踪过程分为自动捕获跟踪和稳定补偿跟踪 2 个过程, 自动捕获跟踪用于卫星的初始对准, 在天线螺旋上升一罐的过程中, 通过比较不同位置的信号能量来寻找信号最佳的位置, 并使天线对准该点, 随后的稳定补偿跟踪本质上即为程序跟踪。文献[16]介绍了一种机载卫星通信天线步进跟踪方法, 此方法是以程序引导的数据为基础, 接着使用步进跟踪进行修正, 使天线可以精确跟踪卫星。

以上所述是目前广泛应用的跟踪技术, 这些跟踪技术及其改进方案可以在一定程度上提高跟踪对准的精度。但毫米波 MIMO 多天线系统的跟踪对准更为复杂, 而上述跟踪技术在造价成本和精确度之间很难做到折中。因此, 在毫米波 MIMO 多天线系统中应当开发出跟踪速度快、跟踪精度高、抗干扰能力强和造价成本低的跟踪技术, 这样才能够未来卫星通信系统中广泛应用。

3.2 MIMO 多天线跟踪模型

在毫米通信系统中, 在地球站和移动卫星分别采用具有方向性的波束以覆盖特定范围的方位到达角和方位离开角。为了保持通信链路, 发送的波束必须根据地球站的运动和旋转进行周期性的调整, 所以跟踪对准主要研究建立通信链路后的保持问题。然而, 如果没有适时地对相移器进行权重更新, 通信链路将很快中断。目前已经提出了一些用于 MIMO 多天线系统跟踪对准的方法。文献[17]提出一种基于码本的方法, 它能够实现通信链路建立和跟踪对准。码本是码字的集合, 也代表了相移器的权重。文献[18]介绍一种基于扰动的波束跟踪对准方法。训练波束是由当前波束的扰动权重所设计, 并且选择具有最大增益的训练波束用于权重更新, 但是这种方法只能支持较低的角速度。文献[19]提出一种基于波束模式的跟踪方法, 到达方位角 (AOA) 是由接收阵列的波束模式所估计, 然后再利用所估计的到达方位角得到更新的相移器权重。虽然基于波束模式的跟踪算法计算复杂度更高, 但相比以上所提到的 2 种方法, 基于波束模式的跟踪算法有以下 2 个优点: 1) 在每一个相移器更新权重后, 它能够提供更精确的波束对齐和实现接近最优的吞吐量; 2) 它能够支持很大范围的移动台旋转角速度。

这里考虑从移动卫星到地球站下行链路宽带毫米波通信系统, 移动卫星和地球站都装备一个射频链路和一个均匀平面天线阵列, 如图 3 所示。特别地, 地球站配置 $M \times M$ 的均匀平面阵列而移动卫星配置 $N \times N$ 的均匀平面阵列。邻近的 2 根天线之间的距离为 d , 载频的波长为 λ 。此系统同样适用于上行链路、多射频链路、多用户、窄带等通信系统。移动卫星发射信号为 $s(f)$, 则到达地球站的接收信号为

$$r(f) = \mathbf{c}^H \mathbf{H}(f) \mathbf{b} s(f) + \mathbf{c}^H \mathbf{z}(f) \quad (4)$$

其中, $f \in \{0, 1, \dots, F-1\}$ 表示 OFDM 子载波索引, F 是

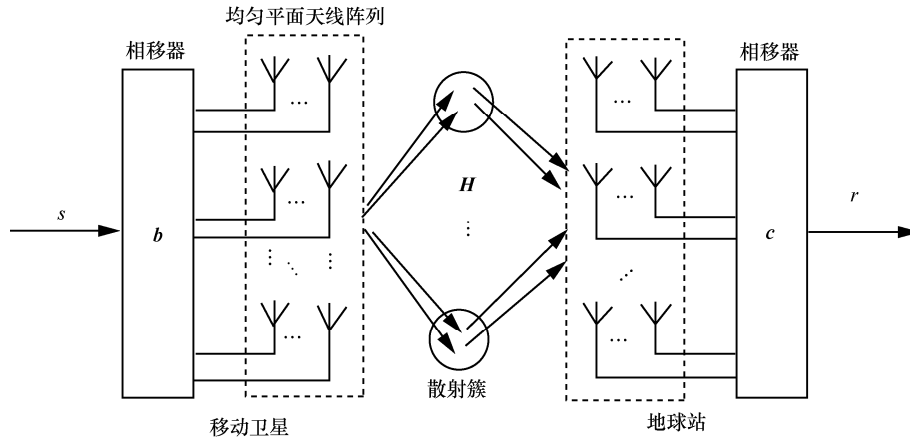


图 3 点到点下行链路毫米波通信系统

子载波的总数量， $\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_{M^2}]^T$ 和 $\mathbf{c} = [c_1, \dots, c_{N^2}]^T$ 分别是移动卫星和地球站的波束赋形系数。 $s(f)$ 和 $r(f)$ 是子载波为 f 的发送信号和接收信号。 $\mathbf{H}(f) \in \mathbb{C}^{N^2 \times M^2}$ 表示信道矩阵的频率响应， $\mathbf{z}(f) \in \mathbb{C}^{N^2 \times 1}$ 表示地球站天线阵列的噪声向量并且服从高斯独立同分布。由于系统硬件受限制，波束赋形幅度系数是固定的而角度系数量化为 Q bit。根据文献[19]，如果满足 $Q > 4$ ，相位量化对相位矩阵的影响很小。这里对宽带毫米波卫星通信系统结构的描述，能够为 MIMO 多天线跟踪对准的研究提供基础的理论支持，也有利于在后续的工作中研究出更加完善的 MIMO 多天线捕获跟踪技术。

3.3 MIMO 多天线信道估计

MIMO 多天线系统的对准跟踪需要完整的信道状态信息，但信道估计对于混合预编码器和大规模天线阵列的毫米波系统是一个很大的挑战。这里考虑移动卫星与地球站之间的下行链路信道估计，假设最初的波束对齐已经建立。根据文献[20]，非视距传输路径损耗远大于视距路径损耗，这就意味着功率衰退与散射路径有很大关系。在 MIMO 多天线系统中，只考虑信道模型中主路径的跟踪对准。因此，该毫米波信道是频率选择性平坦衰落信道，这里给出信道矩阵中频率为 f 的（频率为 f 时信道矩阵的）表达式

$$\mathbf{H} = \mathbf{g} \mathbf{a}_R(\boldsymbol{\Omega}_R) \mathbf{a}_T^H(\boldsymbol{\Omega}_T) \quad (5)$$

其中， \mathbf{g} 是复数增益， $\boldsymbol{\Omega}_T = [\theta_T \ \phi_T]$ 和 $\boldsymbol{\Omega}_R = [\theta_R \ \phi_R]$ 分别是追踪路径的离开方位角和到达方位角。向量 $\mathbf{a}_T(\boldsymbol{\Omega}_T) \in \mathbb{C}^{M^2 \times 1}$ 表示地球站天线在角度为 $\boldsymbol{\Omega}_T$ 时的阵列响应，向量 $\mathbf{a}_R(\boldsymbol{\Omega}_R) \in \mathbb{C}^{N^2 \times 1}$ 表示移动卫星天线在角

度为 $\boldsymbol{\Omega}_R$ 时的阵列响应。角标 T 和 R 分别表示发送端和接收端，而 θ 和 ϕ 分别表示方位角和仰角。这里简单介绍了典型的 MIMO 多天线信道模型，但是现有的毫米波信道估计方法仍旧训练开销过大，复杂度较高，信道估计的精确度较低。因此，迫切需要提出新的毫米波信道估计方法来解决目前遇到的问题。

毫米波系统使用混合预编码器阻碍了数字基带直接接入信道，为了解决这个问题，文献[21]提出一种快速波束扫描和搜索技术。通过让信号发送端和接收端扫描预先确定波束码本中的编码波束，然后搜索到最好的预编码器和组合器的配对。但是这种方法随着天线数和码本大小的增加，系统训练开销会变大。与毫米波系统中波束扫描技术不同，文献[22]通过 CANDECOMP/PARAFAC(CP)分解直接估计毫米波信道及信道相关参数。值得注意的是，通过探究毫米波信道稀疏散射的特性，毫米波信道估计问题能够变成稀疏信号恢复问题。基于压缩感知 (CS, compressed sensing) 的毫米波信道估计方法虽然能够降低训练开销^[22]，但训练开销仍旧过大、训练耗时较长且信道估计的精确度较低。

3.4 毫米波信道估计性能仿真

本文主要对 MIMO 多天线毫米波系统中常用的 2 种方法进行仿真：基于压缩感知的信道估计与基于 CP 分解的信道估计。文献[22]通过 CP 分解将地球站接收信号分解成一系列一阶张量的线性组合，并通过分解后的参数矩阵估计信道。相比基于压缩感知的毫米波估计方法，基于 CP 分解的信道估计方法不但降低导频训练开销，缩短阵列天线对准时间，而且信道估计精确度得到大幅度提高。

本文采用 2 种衡量指标来度量算法的性能。一个是用来衡量毫米波信道的恢复准确性，叫作归一

化均方误差 (NMSE, normalized mean squared error); 一个是用来衡量接收端信号强度, 叫作信噪比 (SNR, signal-to-noise ratio)。

$$NMSE = \frac{\sum_{u=1}^U \|\mathbf{H}_u - \hat{\mathbf{H}}_u\|_F^2}{\sum_{u=1}^U \|\mathbf{H}_u\|_F^2} \quad (6)$$

$$SNR = \frac{\|\mathbf{y} - \mathbf{w}\|_F^2}{\|\mathbf{w}\|_F^2} \quad (7)$$

其中, \mathbf{y} 与 \mathbf{w} 分别表示接收信号与加性噪声。

在本文仿真中, 地球站和移动卫星同时使用均匀线性阵列天线, 且相邻天线的距离为信号的半波长, 毫米波信道各 AoA 与 AoD 分布在 $[0, 2\pi]$ 中, 复增益 $\alpha_{u,l}$ 为随机变量, 服从循环对称高斯分布 $\alpha_{u,l} \sim CN\left(0, \frac{N_{BS}N_{MS}}{\rho}\right)$, $\rho = \left(\frac{4\pi Df_c}{c}\right)^2$, D 表示地球站与移动卫星之间的距离, f_c 表示载频, c 表示光速。图 4 分别为相同毫米波信道下采用基于 CP 分解的信道估计方法与基于 CS 的信道估计方法的 NMSE 随着 SNR 的变化情况。本文考虑的 2 种 CS 算法分别将 AoA-AoD 空间离散化到 64×32 与 128×64 的格点上, 基于 CP 分解的信道估计方法采用的是将 AoA-AoD 空间离散化到 256×128 的格点上。从图 4 可以看出, 在信道估计精确度方面, 基于 CP 分解的信道估计算法明显比基于 CS 的 2 种网格算法精确度更高。从表 1 可以看出, 虽然所提基于 CP 分解信道估计算法相比 CS-Grid II 信道估计算法采用更多格点, 但基于 CP 分解的信道估计算法平均运行时间更短, 计算复杂度更低。

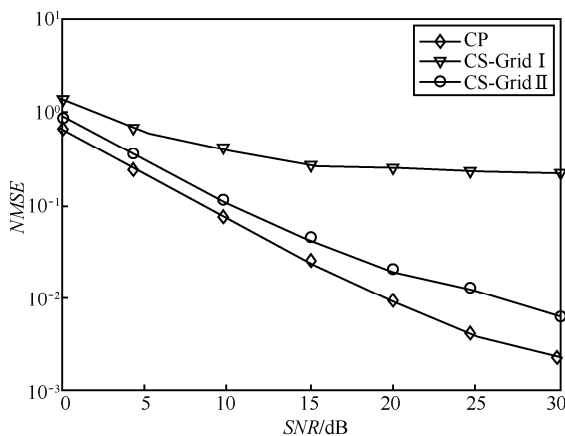


图 4 NMSE 随着 SNR 的变化

表 1 不同信道估计算法的运行时间

ALG	Grid	NMSE	平均运行时间/s
CS	64×32	2.5×10^{-1}	16.5
	128×64	6.7×10^{-1}	270
CP	256×128	2.7×10^{-1}	23

4 结束语

空间信息网络是当今国际科学发展的一个重大前沿和战略制高点, 在服务远洋航行、应急救援、导航定位、航空运输、航天测控等重大应用的同时, 向下可支持对地观测的高动态、宽带实时传输, 向上可支持深空探测的超远程、大时延可靠传输, 从而将人类科学、文化、生产活动拓展至空间、远洋, 乃至深空, 是全球范围的研究热点。为了实现移动卫星和地球站之间的实时高速通信, 移动卫星和地球站都需要使用 MIMO 多天线系统。本文通过对毫米波 MIMO 通信系统中的波束赋形技术、跟踪对准技术及信道估计的介绍, 能够全方位、多角度地了解在未来空间信息网络建设过程中将要面临的问题。在理论方法研究和关键技术攻关的基础上, 适时启动我国自主空间信息网络系统的建设。通过探索新理论、新方法, 能够有力支持空间信息服务能力的大幅提升, 这对推动经济转型发展、维护国家安全具有重大战略意义。

参考文献:

- [1] 李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6):711-715.
LI D R, SHEN X, GONG J Y, et al. On the construction of space information network in China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6):711-715.
- [2] 王晓海. 毫米波通信技术的发展与应用[J]. 电信快报, 2007, (10): 23-25.
WANG X H. The development and application of millimeter wave communication technology[J]. Telecommunications Information, 2007, (10):23-25.
- [3] DANIELS R C, HEATH JR R W. 60 GHz wireless communications: emerging requirements and design recommendations[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2007, 2(3):41-50.
- [4] ROH W, SEOL J Y, PARK J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2):106-113.
- [5] BAI T, HEATH R W. Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(2):1100-1114.
- [6] ZHANG X Y, MOLISCH A F, KUNG S Y. Variable-phase-shift-based

- RF baseband codesign for MIMO antenna selection[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(11):4091-4103.
- [7] KIM T, PARK J, SEOL J Y, et al. Tens of Gbps support with mmwave beamforming systems for next generation communications[C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2013: 3685-3690.
- [8] AYACH O E, HEATH J R R W, RAJAGOPAL S, et al. Multimode precoding in millimeter wave mimo transmitters with multiple antenna sub-arrays[C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2013:3476-3480.
- [9] AYACH O E, RAJAGOPAL S, ABU-SURRA S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(3):1499-1513.
- [10] SINGH J, RAMAKRISHNA S. On the feasibility of codebook-based beamforming in millimeter wave systems with multiple antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(5): 2670-2683.
- [11] SAYEED A, BRADY J. Beam-space MIMO for high-dimensional multiuser communication at millimeter-wave frequencies[C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2013: 3679-3684.
- [12] ALKHATEEB A, LEUS G, HEATH R W. Limited feedback hybrid precoding for multi-user millimeter wave systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 14(11):6481-6494.
- [13] 陈金来. 卫星天线跟踪技术特点分析[J]. 信息通信, 2014, (8): 22-23.
CHEN J L. Analysis of the characteristics of satellite antenna tracking technology[J]. Information & Communications, 2014, (8): 22-23.
- [14] 陈洪. 航天测控飞机卫星移动通信天线跟踪技术的分析研究[J]. 军事通信技术, 2001(1):27-31,68.
CHEN H. Analysis and research on the tracking technology of satellite mobile communication antenna for space TT & C aircraft[J]. Journal of Military Communications Technology, 2001(1):27-31, 68
- [15] 孙兴邦. 卫星天线自动跟踪算法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
SUN X B. Research on automatic tracking algorithm of satellite antenna[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
- [16] 魏英杰. 机载卫星通信天线的步进跟踪应用[J]. 无线电工程, 2014(12): 25-28.
WEI Y J. The step tracking application of airborne satellite communication antenna[J]. Radio Engineering, 2014(12): 25-28.
- [17] SONG N, ZOLTOWSKI M D, LOVE D J. Multi-resolution codebook and adaptive beamforming sequence design for millimeter wave beam alignment[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, PP(99):1-1.
- [18] HE J, KIM T, GHAUCH H, et al. Millimeter wave MIMO channel tracking systems[C]// GLOBECOM Workshops. 2014:416-421.
- [19] GAO K, CAI M, NIE D, et al. Beampattern-based tracking for millimeter wave communication systems[C]// Global Communications Conference. 2017.
- [20] 5G Channel Model White Paper[R]. 5G Channel Model for bands up to 100 GHz, Tech Rep, 2016.
- [21] TSANG Y M, POON A S Y, ADDEPALLI S. Coding the BEAMS: improving beamforming training in mmwave communication system[C]// Global Telecommunications Conference. 2011:1-6.
- [22] ZHOU Z, FANG J, YANG L, et al. Channel estimation for millimeter-wave multiuser MIMO systems via PARAFAC decomposition[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7501-7516.

作者简介:



马新迎(1991-), 男, 河南驻马店人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为 5G 新型多址技术、MIMO 多天线系统中混合波束赋形。



陈智(1974-), 男, 四川成都人, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代宽带无线接入创新技术、毫米波与太赫兹无线通信技术开发、无线移动通信及抗干扰关键技术等。



马斯(1994-), 女, 四川乐山人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为毫米波 MIMO 多天线系统中波束赋形。



方俊(1977-), 男, 四川成都人, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信号处理及其应用、基于压缩采样理论的超宽带接收机、深度学习与稀疏理论、大规模天线与毫米波通信中的信号处理等。