

# 一种卫星多波束多用户稀疏信道模型

彭博溢<sup>1</sup>, 王珂<sup>1</sup>, 林文亮<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876 ;

2. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876 )

**摘要:** 针对卫星通信系统中, 相控阵天线多波束多用户的通信场景, 提出一种在角度-时延域稀疏的信道模型。该模型通过分析信道在角度域的信道协方差矩阵来得到信道在角度域的稀疏性, 通过时延域少量的多径得到时延域的稀疏性。通过仿真分析, 该模型能够反应随着卫星运动, 不同方位角时的信道的稀疏性特征, 为低轨卫星大规模部署后的通信测试和使用提供了理论基础。

**关键词:** 无线通信; 相控阵天线; 卫星信道; 信道稀疏性。

**中图分类号:** TN92

## A satellite multi-beam multi-user sparse channel model

PENG Boyi<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, LIN Wenliang<sup>2</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876;

2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract:** The channel model with sparsity in angle-delay domain is proposed for the multi-beam multi-user communication scenario with phased array antennas in satellite communication system. The sparsity of the model in the angle domain is obtained by analysing the channel covariance matrix of the channel in the angle domain, and the sparsity in the delay domain is obtained by a small amount of multipath in the delay domain. Through simulation analysis, the model is able to reflect the sparsity characteristics of the channel at different azimuths with the satellite motion, which provides the theoretical basis for the communication test and use of LEO satellites after large-scale deployment.

**Keywords:** wireless communication; phased array antenna; satellite channel; channel sparsity

## 0 引言

随着无线通信系统的发展, 高通量卫星系统已成为空间通信技术领域的一大研究热点, 星载相控阵天线作为该系统的关键组成部分, 采用多波束通信方案是有效提高系统通信容量的有力措施<sup>[1]</sup>。卫星信道状态对于信道状态信息反馈、预编码、波束赋形等技术是必不可少的<sup>[2]</sup>, 因此研究卫星信道的稀疏性对分析信道情况具有重要意义。

很多学者和研究机构在研究卫星信道上做了大量贡献: ITU 从 1986 年就开始研究空地通信系统中无线电波传输损耗的计算方法, 并推出了 ITU-R P.618 建议书被广泛使用<sup>[3]</sup>。3GPP 自 Release 15 开始着手研究地面网络与卫星网络相融合, 在 Release 17 形成正式标准<sup>[4]</sup>。同时, 为研究卫星多普勒, 考虑不同仰角场景, 得到了多普勒频移随卫

**作者简介:** 彭博溢 (2000-), 女, 主要研究方向: 卫星通信

**通信联系人:** 王珂 (1986-), 男, 博导, 主要研究方向: 卫星通信、空天地网络、6G 通信. E-mail: wangke@bupt.edu.cn

星运动角速度与卫星仰角变化的表达式<sup>[5]</sup>，相控阵天线的应用，为信道增加了角度域资源<sup>[6]</sup>，由于波束的指向性，信道在角度域具有稀疏性<sup>[7]</sup>，因此，本文推导了卫星信道在角度域的稀疏性关系，提出一种卫星角度-时延域的稀疏性信道建模方法。

## 1 卫星信道模型

### 1.1 卫星相控阵天线结构

本文考虑的场景为多用户的 LEO 卫星通信系统，该卫星服务于  $K$  个用户，每个用户配备有一个全向天线。卫星配备由  $M$  ( $M \gg 1$ ) 根均匀线性阵列 (Uniform Linear Array, ULA) 天线。ULA 天线结构如图 1 所示，天线发送信号离开角 (Direction of Arrival, AoD)  $\theta$  垂直于该阵列，则该 ULA 天线对应的阵列响应  $\mathbf{a}(\theta)$  为：

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{j2\pi\frac{d}{\lambda}\sin(\theta)}, \dots, e^{j2\pi\frac{d}{\lambda}(M-1)\sin(\theta)}]^T$$

其中  $\lambda$  是信号波长， $d$  是天线间距离。

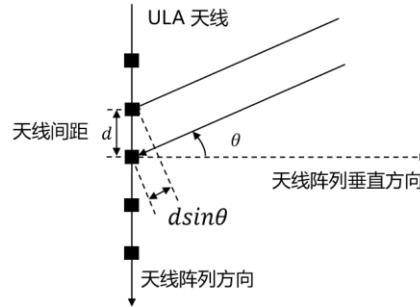


图 1 ULA 天线结构

### 1.2 卫星相控阵多波束多用户信道模型

单发送单接收天线的时-频-空间域信道模型如下<sup>[6]</sup>：

$$h(t, f, \mathbf{x}) = \iiint e^{j2\pi(-f\tau + \lambda^{-1}\theta\mathbf{x} + v\tau)} h_{\theta, \tau, v}(\theta, \tau, v) d\theta d\tau dv$$

55

其中  $f$  为子载波频率， $t$  为当前通信时刻， $\mathbf{x}$  为任意点为原点时 UE 在空间中的位置坐标， $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ ， $\theta$ 、 $\tau$  和  $v$  分别为信号的发射方向、时延和多普勒。 $h_{\theta, \tau, v}(\theta, \tau, v)$  为信道在角度-时延-多普勒域的联合增益。

为了将上式化简，假设时延域衰落与角-多普勒域联合衰落不相关，用  $h_{\theta, \tau}(\theta, \tau)$  表示角度-多普勒联合衰落，每条多径在时延域中表现为一个冲击响应。则：

60

$$h_{\theta, \tau, v}(\theta, \tau, v) = \sum_{l=1}^L p_l \delta(\tau - \tau_l) h_{\theta, \tau}(\theta, \tau)$$

其中  $l$  表示第  $l$  条多径， $L$  为多径数量， $p_l$  为每条径的衰落，因此，上式可表达为：

$$h(t, f, \mathbf{x}) = \sum_{l=1}^L \iiint e^{j2\pi(-f\tau_l + \lambda^{-1}\theta\mathbf{x} + v\tau)} p_l \delta(\tau - \tau_l) h_{\theta, \tau}(\theta, \tau) d\theta d\tau dv$$

$$= \sum_{l=1}^L p_l \int \int e^{j2\pi(f\theta x + vt)} h_{\theta,\tau}(\theta, \tau) d\theta d\tau \cdot e^{j2\pi(-f\tau_l)}$$

65 选取 UE 为原点，则  $x=(0,0,0)$ ，上式被化简为

$$h(f, t) = p_l \sum_{l=1}^L \int \int e^{j2\pi vt} h(\Omega, v) d\Omega dv \cdot e^{j2\pi(-f\tau_l)}$$

由此得到单发送单接收天线信道的表达式。当卫星安装线阵相控阵时，以第一根天线为原点，天线方向与垂直天线方向建二维坐标系，只考虑方位角 $\theta$ 。此时卫星相控阵天线信道表达式为：

$$h(f, t) = \sum_{l=1}^L p_l \int \int a(\theta) e^{j2\pi vt} h_{\theta,\tau}(\theta, \tau) d\theta d\tau \cdot e^{j2\pi(-f\tau_l)}$$

70

为进一步对信道进行化简，假设角度域增益 $h_{\theta}(\theta)$ 与多普勒域增益 $h_v(v)$ 不相关，则上式化简为：

$$\begin{aligned} h(f, t) &= \sum_{l=1}^L p_l \int \int a(\theta) e^{j2\pi vt} h_{\theta}(\theta) \cdot h_v(v) d\theta dv \cdot e^{j2\pi(-f\tau_l)} \\ &= \sum_{l=1}^L p_l \int a(\theta) h_{\theta}(\theta) d\theta \cdot \int e^{j2\pi vt} h_v(v) dv \cdot e^{j2\pi(-f\tau_l)} \end{aligned}$$

75

其中 $h_{\theta}(\theta)$ 为 AoD 增益函数。由于在多普勒域上，每条径表现为一个冲激响应，则 $h_v(v)$ 为冲激响应，用 $v_l$ 表示每条径的多普勒，则上式化简为：

$$h(f, t) = \sum_{l=1}^L p_l \int a(\theta) h_{\theta}(\theta) d\theta \cdot e^{j2\pi v_l t} \cdot e^{j2\pi(-f\tau_l)}$$

本文考虑卫星大带宽通信场景，共有 1024 个子载波。因此卫星相控阵大带宽信道模型为：

$$h(f, t) = \sum_{l=1}^L p_l \int a(\theta) h_{\theta}(\theta) d\theta \cdot e^{j2\pi v_l t} \cdot e^{j2\pi(-f_0 + i\Delta f)\tau_l}$$

80

其中 $f_0$ 为初始子载波的载波频率， $\Delta f$ 为子载波间隔。

由于卫星通信场景中不同终端之间的距离很长，因此不同终端与卫星之间的信道可以看作是不相关的[2]。本文忽略不同波束间的波束干扰，则卫星与第  $k$  个 UE 之间的下行信道空间频域的信道响应表示为：

$$h_k(f, t) = p_k \sum_{l=1}^L \int a(\theta_k) h_{\theta}(\theta_k) d\theta \cdot e^{j2\pi v_{k,l} t} \cdot e^{j2\pi(-f_0 + i\Delta f)\tau_{k,l}}$$

85

其中 $p_k$ 为大尺度衰落，对于每个用户的每条径是相同的。与地面基站通信相比，卫星与 UE 之间的距离更长，带来较大的时间延迟。定义直射路径最短时延为 $\tau_k^{min} = \frac{L_1}{c}$ ，其中 $L_1$ 为卫星与 UE 的直射距离， $c$ 为光速。则 $\tau_{k,l} = \tau_k^{min} + \tau_{k,l}^{UE}$ ，其中 $\tau_{k,l}^{UE}$ 为每条多径相对于直射径的延迟。

## 2 信道在角度-时延域稀疏性

将上节建模的信道模型从空间-频域表达式转换到角域，计算如下：

$$\tilde{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}} = \mathbf{F}_{\mathbf{M}} \mathbf{h}_{\mathbf{k}}$$

其中 $\mathbf{F}_{\mathbf{M}}$ 是 $M$ 阶离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 矩阵,  $[\mathbf{F}_{\mathbf{M}}]_{p,q} = \frac{1}{M} e^{-j\frac{2\pi pq}{M}}$ , 其中 $(p,q)$ 表示 $\mathbf{F}_{\mathbf{M}}$ 第 $p$ 行 $q$ 列元素。

用 $\mathbf{h}_{\mathbf{k}'}$ 表示第 $\mathbf{k}'$ 个 UE 的信道, 第 $\mathbf{k}$ 个 UE 的信道与第 $\mathbf{k}'$ 个 UE 的信道在角度域的相关性计算如下:

$$\begin{aligned} E(\tilde{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}} \tilde{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}'}^H) &= p_{\mathbf{k}} p_{\mathbf{k}'} \sum_{l=1}^L e^{j2\pi(v+v')t} \cdot e^{j2\pi(f_0+i\Delta f)(\tau_{k,l}+\tau_{k',l})} \\ &\cdot E\left(\mathbf{F}_{\mathbf{M}} \int_{\theta_{\mathbf{k}}^{\min}}^{\theta_{\mathbf{k}}^{\max}} \int_{\theta_{\mathbf{k}'}^{\min}}^{\theta_{\mathbf{k}'}^{\max}} \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^T(\theta) \mathbf{h}_{\theta}(\theta) \mathbf{h}_{\theta}^H(\theta') d\theta' d\theta \mathbf{F}_{\mathbf{M}}^H\right) \end{aligned}$$

其中 $E$ 计算为计算期望。

假设不同 UE 和 AoD 的信道是不相关的, 即, 其中 $\mathbf{P}_{\mathbf{A}}(\theta)$ 为角度功率谱 (power angle spectrum, PAS), 则上式可以表示为:

$$E(\tilde{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}} \tilde{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}'}^H) = p_{\mathbf{k}} p_{\mathbf{k}'} \sum_{l=1}^L e^{j2\pi(v+v')t} \cdot e^{j2\pi(f_0+i\Delta f)(\tau_{k,l}+\tau_{k',l})} \cdot \mathbf{F}_{\mathbf{M}} \int_{\theta_{\mathbf{k}}^{\min}}^{\theta_{\mathbf{k}}^{\max}} \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^T(\theta) \mathbf{P}_{\mathbf{A}}(\theta) d\theta \mathbf{F}_{\mathbf{M}}^H$$

因此, 信道空间协方差矩阵可以表示为 $\Omega_{\mathbf{k}} = \mathbf{F}_{\mathbf{M}} \int_{\theta_{\mathbf{k}}^{\min}}^{\theta_{\mathbf{k}}^{\max}} \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^T(\theta) \mathbf{P}_{\mathbf{A}}(\theta) d\theta \mathbf{F}_{\mathbf{M}}^H$ 。当 $M$ 足够大时,  $\Omega_{\mathbf{k}}$ 近似于对角矩阵, 且该对角矩阵的非零元素的位置与 AoD 有关。在角度域中,  $[\theta_{\mathbf{k}}^{\min}, \theta_{\mathbf{k}}^{\max}]$ 区间内对应的元素是非零的, 非零的元素可以由 $\mathbf{Q}_{\mathbf{k}}$ 进行索引<sup>[7]</sup>:

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{k}} = \left\{ p \mid \left\lfloor M \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_{\mathbf{k}}^{\min}) \right\rfloor + \frac{M}{2} \leq p \leq \left\lfloor M \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_{\mathbf{k}}^{\max}) + \frac{M}{2} \right\rfloor, p \in \mathbb{Z} \right\}$$

在这种情况下, 由于卫星覆盖范围有限,  $\theta$ 的取值范围有限, 因此 $\mathbf{Q}_{\mathbf{k}}$ 包含在区间 $[1, M]$ 中。角域的稀疏性如图 3-所示。每个 UE 的信道在角度域中只显示为几列非零值, 即图中黑色资源块, 并且所有卫星波束资源占据角度域中间部分, 即图中的浅色资源块。因此卫星信道在角度域具有稀疏性。

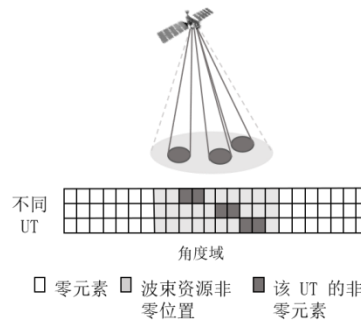


图 2 角度域的稀疏结构

由于每条多径在时延域表现为一个冲击响应, 卫星信道仅包含少数几条可分辨的多径, 因此卫星信道在时延域具有稀疏性。

### 3 仿真结果分析

针对上述建立的信道模型, 本文共设置三个仿真的 case, 分别对应中仰角, 高仰角, 低仰角三种情况。图 3 为三种卫星轨道位置的信道在角度-时延域冲激响应的仿真图。

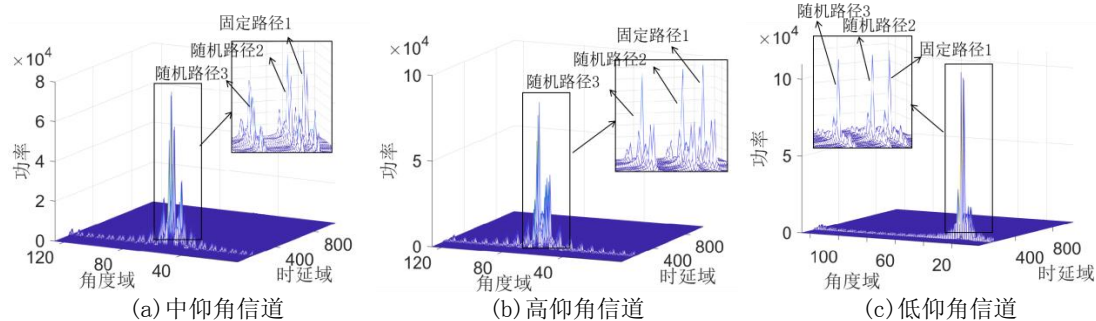


图 3 信道在角度-时延域冲激响应

由于为每个 case 的信道配置了三个不同时延的路径, 从图中可以看到, 每个信道在时延域中共有三条路径, 每个路径延迟  $\tau_1$  分别对应于延迟域中的一条路径。由于  $\tau_1^{UE}$  固定的, 对其对应路径在时延域的位置是固定的,  $\tau_2^{UE}$  和  $\tau_3^{UE}$  是在一定范围内随机的, 因此其对应路径在时延域的位置是在某个范围内随机的。可以看出, 由于在每个 case 时每个 UT 的方位角都是不同的, 角度域中峰的数量和位置是不同的。从图 3(a)(b)可以看出, 当卫星处于中高仰角位置时, 由于每个 UE 对应波束的方位角不同, 在角域上会存在明显的多个峰。从图 3(c)可以看出当卫星处于低仰角位置时, 由于各 UE 之间的方位角差异较小, 信道在角域内的峰合并成一个明显的峰。因此, 信道在角度-时延域的峰值位置和稀疏情况随卫星运动而变化。

### 4 结论

本文提出了一种卫星角度-时延域的稀疏性信道建模方法, 针对卫星信道, 通过分析卫星在角度域的信道空间协方差矩阵, 研究信道在角度域的稀疏性, 仿真结果表明, 该信道可以表现随着卫星运动, 用户仰角的变化, 信道在角度域的稀疏性的变化情况。

#### [参考文献] (References)

- [1] 刘越, 黄印, 林玉洁等. 星地融合网络相控阵天线应用研究进展[J]. 空间电子技术, 2023, 20(06): 52-63.
- [2] Z. Zhang et al., "6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, no. 3, pp. 28-41, Sept. 2019, doi: 10.1109/MVT.2019.2921208
- [3] ITU-R P. 618-2017 Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems[S]. 2017.
- [4] 3GPP TS 38.101-5-2023 NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 5: Satellite access Radio Frequency (RF) and performance requirements[S]. 2023.
- [5] GUIDOTTI A, VANELLI-CORALLI A, CAUS M, et al. Satellite-enabled LTE systems in LEO constellations[C]. 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Paris, France, 2017: 876-881. doi: 10.1109/ICCW.2017.7962769.
- [6] H. Xie, F. Gao, S. Zhang and S. Jin, "A Unified Transmission Strategy for TDD/FDD Massive MIMO Systems With Spatial Basis Expansion Model," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 4, pp. 3170-3184, April 2017, doi: 10.1109/TVT.2016.2594706.
- [7] J. Ma, S. Zhang, H. Li, F. Gao and S. Jin, "Sparse Bayesian Learning for the Time-Varying Massive MIMO Channels: Acquisition and Tracking," in IEEE Transactions on Communications, vol. 67, no. 3, pp. 1925-1938, March 2019, doi: 10.1109/TCOMM.2018.2855197.