

文章编号:1007-5321(2021)04-0102-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-270

# 基于太赫兹通信的高空飞机编队组网研究

何紫璇<sup>1</sup>, 张碧玲<sup>1</sup>, 杭冰清<sup>1</sup>, 王莉<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学 网络教育学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学 计算机学院, 北京 100876)

**摘要:** 针对应用于航空通信场景的太赫兹通信, 基于太赫兹波的高空传播特性, 提出了同时包含确定信道和随机信道的高空太赫兹信道传输模型. 对于确定数量的有人/无人飞机混合编队, 以通信中断概率作为机间通信的可靠性指标, 分析了给定中断概率阈值下高空太赫兹通信的最远机间距离. 面向执行环境监测任务的飞机编队, 提出了满足高空太赫兹通信可靠性指标的最大化编队监测面积的编队位置部署方案. 仿真验证了理论推导的正确性, 求解了最优编队部署, 相比于考虑不完善的太赫兹高空信道模型, 编队最优部署下的最大监测面积提升了约 8%, 为高速的高空组网提供有效支撑方案.

**关键词:** 太赫兹通信; 中断概率; 编队部署

**中图分类号:** TN911.22

**文献标志码:** A

## Aircraft Formation Networking in High Altitude Based on Terahertz Communications

HE Zi-xuan<sup>1</sup>, ZHANG Bi-ling<sup>1</sup>, HANG Bing-qing<sup>1</sup>, WANG Li<sup>2</sup>

(1. School of Network Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Utilizing the Terahertz wave propagation characteristics, this work studies both the deterministic channel model and the statistical channel model of high-altitude Terahertz channel transmission models for aerial communications. The study considers a given number of hybrid manned and unmanned aircraft formation. The inter-aircraft communication reliability performance of the derived propagation channel model is investigated in terms of the communication outage probability, and the maximum distance of Terahertz communication between aircraft is analyzed under the given outage probability threshold. To carry out the environmental monitoring, a formation deployment scheme that maximizes the formation monitoring area under the reliability index of the high-altitude Terahertz communication system is studied. Simulation results validate the correctness of the theoretical derivation and solve the optimal formation deployment. In particular, the maximum monitoring area is improved by about 8% compared with the defectively considered high-altitude Terahertz channel model, which provides an efficient basis for future high-speed high-altitude networking.

**Key words:** Terahertz communications; outage probability; formation deployment

收稿日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1511800)

作者简介: 何紫璇(1996—), 女, 硕士生.

通信作者: 张碧玲(1978—), 女, 副教授, 硕士生导师, E-mail: bilinzhang@bupt.edu.cn.

飞机编队在高空执行环境监测、数据采集等任务时,飞机之间信息的连通性是完成任务的决定性因素<sup>[1]</sup>。出于更高安全性、更快传输速率、更低传输时延的考虑,利用太赫兹频段在高空实现组网通信,一方面可提供的超宽频带能实现大规模数据的超高速传输;另一方面其信息负载能力更强,可灵活利用扩频与跳频技术来实现抗干扰的更稳定可靠通信<sup>[2]</sup>。在面向任务的飞机航空通信场景中,不同飞机所承担的任务角色对高空太赫兹通信网络的可靠性有不同需求,因此通信实体在执行任务前需了解任务特征和编队情况,结合通信指标选择几何队形,以高效完成任务。

太赫兹通信系统逐渐从实验室应用到第5代移动通信系统(5G, the fifth generation of mobile communications system)通信场景中,由于其具有高带宽、窄波束、安全性强的特点,成为下一代高速无线通信的核心技术。太赫兹通信应用从地面拓展到了高空领域以解决飞机间信息交互<sup>[2]</sup>,但是由于针对太赫兹通信信道的建模分析考虑特殊,太赫兹波在大气中有分子吸收衰减等独特传播特性,给在高空机间建立通信并实现高效部署的研究带来挑战。Mendrzik等<sup>[3]</sup>研究了基于太赫兹通信链路的信号感知来实现无人机之间位置与方向的定位,所建立的太赫兹高空信道模型主要考虑自由空间衰减和大气衰减。杨晓帆等<sup>[4]</sup>研究了飞行器利用太赫兹波在进行地面探测时斜视距下大气衰减模型的建模分析。这些研究工作对于太赫兹波传播的建模多只考虑大气吸收衰减,而在实际高空环境受到的随机衰减的考虑均有所欠缺,信道模型无法准确反映其实质高空传播特性,因此这类信道模型直接应用于相关高空组网部署方案上会最终导致所提出的策略无法达到最优。

目前关于高空飞机编队的研究多集中在编队控制方面,涉及编队中成员定位、航迹规划以及队形控制保持等。Zhang等<sup>[5]</sup>提出了基于递推法的无人机编队协同制导控制方法,编队成员通过建立通信链接进行状态信息交换以保证编队飞行保持。游尧<sup>[6]</sup>研究了无人机编队协作下任务行为自主决策机制,通过无人机之间的信息传输协助编队策略的执行。这些现有编队部署的策略研究仅从编队本身的物理运动组成的角度出发,一方面缺乏编队所执行的任务对编队部署需求的结合;另一方面部署策略未考虑所承载通信的网络链路可靠状况对其执行效率的

影响,所以实际应用中往往无法满足复杂高空通信网络的可靠性需求,在这类部署方案下编队成员不能进行稳定信息交互甚至无法通信,从而极大地降低了编队的组网部署实施效率。因此,在航空飞行场景中,可采用太赫兹通信网络作为承载飞机间信息交换的系统。笔者基于太赫兹波在高空传播的特征提出了完整的太赫兹高空信道传输模型,同时面向飞机编队的监测任务需求,对于特定数量的有人/无人飞机混合编队,以通信中断概率作为机间通信可靠性指标,探索了基于高空太赫兹通信的最优组网部署方案。

## 1 高空太赫兹通信模型

太赫兹波的频率为超高频段,且为处于数百微米数量级的超短波长,因此,在太赫兹高空通信传播的建模时,需要考虑自由空间传播的路径增益、大气中的氧气和水滴等物质对太赫兹波传播产生的影响以及高空环境中大气湍流引起的随机衰落等因素。

### 1.1 自由空间传播损耗

在无线链路中,接收端的接收功率随着距离的增加呈2次递减,其自由空间的路径增益可描述为<sup>[7]</sup>

$$h_{\text{free}}(d_{i,j}, f_{\text{THz}}) = \left( \frac{c \sqrt{G_i G_j}}{4\pi f_{\text{THz}} d_{i,j}} \right)^2 \quad (1)$$

其中; $f_{\text{THz}}$ 为进行信息交互两架飞机*i*和*j*采用的太赫兹波的频率, $c$ 为光速, $d_{i,j}$ 为收发双方的通信距离, $G_i, G_j$ 分别为发射、接收天线的增益。

### 1.2 大气衰减

太赫兹波的波长较短,太赫兹信道易受大气中极性分子的影响,产生一定的衰减<sup>[7]</sup>。当天气比较晴朗或是空气质量比较好时,大气环境比较稳定,太赫兹信道在大气中的衰减主要取决于大气中极性分子的吸收衰减,其中,线谱吸收和连续吸收对太赫兹波段吸收衰减的影响最大<sup>[8]</sup>。

#### 1) 线谱吸收

线谱吸收表示大气中介质分子能够吸收电磁波能量的相对单位体积。设线谱吸收系数为 $\alpha_1$ ,则 $\alpha_1$ 为多条吸收线谱的吸收系数 $\kappa_1^i(f)$ 总和<sup>[7]</sup>:

$$\alpha_1 = \kappa_1(f) = \sum_i \kappa_1^i(f) \quad (2)$$

#### 2) 连续吸收

导致连续吸收的原因有很多,主要包括水汽自展宽和远翼效应引起的连续吸收;氧气、水分子与大

气中其他分子之间的碰撞导致的谱线碰撞展宽吸收,如  $N_2 - N_2$ ,  $N_2 - O_2$ ,  $O_2 - N_2$  和  $O_2 - O_2$ ; 水汽二聚物与多聚物引起的吸收等. 这里,连续吸收系数  $\alpha_c(f_{\text{THz}})$  为干空气连续吸收系数  $\alpha_{c,\text{dry}}$  和水汽连续吸收系数  $\alpha_{c,\text{H}_2\text{O}}$  之和<sup>[7-8]</sup>,有

$$\alpha_c(f_{\text{THz}}) = \alpha_{c,\text{dry}} + \alpha_{c,\text{H}_2\text{O}} = f_{\text{THz}}^2 q_s (q_f C_s \theta^3 + q_f C_f \theta^{3.5}) \quad (3)$$

其中:  $q_s, q_f$  分别为分子自身压强和外部气体压强,  $C_s, C_f$  分别为自连续和外部连续系数,  $\theta = 300/T$ ,  $T$  为温度(K).

太赫兹波传输的大气衰减系数为线谱吸收与连续吸收的总和,即<sup>[8]</sup>

$$\alpha(f_{\text{THz}}) = \alpha_l(f_{\text{THz}}) + \alpha_c(f_{\text{THz}}) \quad (4)$$

因此,根据 Beer-Lambert 定理,得到给定太赫兹波长  $f_{\text{THz}}$  以及收发双方通信距离  $d_{i,j}$  下信道的大气分子吸收增益<sup>[8]</sup>为

$$h_{\text{mole}}(d_{i,j}, f_{\text{THz}}) = e^{-\alpha d_{i,j}} \quad (5)$$

### 1.3 随机信道衰落

太赫兹波在高空大气中的传播受到大气湍流的影响,会产生随机性衰落<sup>[9]</sup>. 大气湍流产生的信道增益服从对数正态分布(log-normal distribution). 设由大气湍流产生的随机信道增益为  $h_a$ ,其概率密度分布函数(PDF, probability density function)表示为<sup>[9]</sup>

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{1}{2h_a \sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[ -\frac{(\ln(h_a) - \mu)^2}{8\sigma^2} \right] \quad (6)$$

其中:  $\sigma^2$  为对数幅度方差,  $\mu$  为均值.  $h_a$  的累计概率密度函数(CDF, cumulative distribution function)为

$$F_{h_a}(h_a) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf} \left[ \frac{\ln(h_a) - \mu}{\sigma \sqrt{8}} \right] \quad (7)$$

其中  $\text{erf}[\cdot]$  为误差函数.

### 1.4 高空环境下太赫兹信道增益

综合考虑自由空间传播路径损耗、大气分子吸收损耗和大气湍流,高空环境下的太赫兹信道增益为

$$h(d_{i,j}, f_{\text{THz}}) = h_{\text{free}}(d_{i,j}, f_{\text{THz}}) h_{\text{mole}}(d_{i,j}, f_{\text{THz}}) h_a = \left( \frac{c \sqrt{G_i G_j}}{4\pi f_{\text{THz}} d_{i,j}} \right)^2 e^{-\alpha d_{i,j}} h_a \quad (8)$$

## 2 高空飞机编队建模

高空场景中,飞机以编队的形式从起飞点飞入目标环境监测空域,执行环境监测任务. 依据监测

任务的要求,由一架有人机和多架无人机组成混合编队,并采用主机—从机的控制模式<sup>[10]</sup>. 其中,有人机作为主机,主要负责发布控制、保持飞机队形的相关决策指令以及收集编队内从机所返回的环境信息并加以汇总;无人机作为从机,向主机汇报观察信息和各自位置信息. 同时,从机之间也需要保持一定的通信链接,交换相关的环境、状态等信息.

### 2.1 飞机编队模型

在图1所示的高空场景中,假设飞机编队采用编队覆盖面积大的菱形作为几何队形,以适用于监测任务<sup>[6]</sup>. 设定的编队由6架飞机组成,即  $M=6$ ,包括1架有人机(主机,  $i=1$ )和5架无人机(从机,  $i=2, \dots, 6$ ). 这里,主机位于队形末端,从机位于队形前端并依次排开.

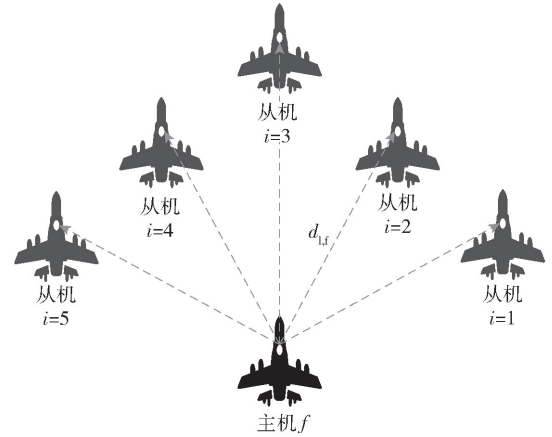


图1 高空飞机编队队形

一方面飞机的排列需满足大于避免碰撞的最小间距;另一方面,根据编队在执行任务时所严格保持的菱形几何队形,可通过在编队中建立起刚性图  $g(v, \varepsilon)$  来描述并约束编队成员之间的位置关系,同时限制部分边的长度使得编队保持整个几何构型<sup>[11]</sup>. 令  $v$  表示飞机节点建立起来的顶点集(数量为6),  $\varepsilon$  为两两节点之间建立起来的边的距离集合. 对于刚性图,有以下描述.

1) 刚性图中的每个节点至少有2条相邻的边,对于任意节点  $i$  的度  $\mathcal{D}_i$  满足:

$$\mathcal{D}_i \geq 2, 1 \leq i \leq M \quad (9)$$

2) 若刚性图为“最小刚性图”,即刚性图中任意一条边的缺失都会使图变成可变形图,则其节点与边的数量满足等式:

$$|\varepsilon| = 2M - 3 \quad (10)$$

3) 结合编队在飞行过程中的位置关系与几何

形状保持不变,这里引入“关系不变最小刚性图(RIMRG, relation-invariable minimal rigid graph)”,可对编队中处于特殊位置的飞机节点进行约束限制,即对于刚性图中任意2个节点 $v_i$ 和 $v_j$ ,若二者之间存在连接边,则二者的距离( $d_{ij}$ )都保持某一规定的定值 $\mathcal{C}$ ,表示为

$$d_{ij} = \mathcal{C} \quad \forall (i, j) \in \mathcal{E} \quad (11)$$

## 2.2 编队通信中断概率与最大机间距离

主机在高空执行任务中,需要向编队成员发布队形变换指令、任务决策指令以及一些环境信息<sup>[10]</sup>.因此,编队采用高空太赫兹通信网络承载编队中的信息交互,并以时分多址(TDMA, time division multiple access)形式发送信息.主机作为信息的发送方,采用广播的通信模式向其余作为信息接收方的从机发送信息,那么任意从机接受信息的信噪比(SNR, signal-to-noise ratio)表示为

$$\gamma_{12f}(d_{1,f}) = \frac{h(d_{1,f}, f_{\text{THz}}) W_1}{n_0} \quad (12)$$

其中: $W_1$ 为主机的发送功率, $n_0$ 为噪声功率.

当高空中进行信息交互的飞机距离相隔过大时,太赫兹信道会随距离衰减,并产生通信中断的情况,这样不利于编队的保持和任务的高效完成.因此,为确保任意1架从机均能接收到来自主机的信息,定义从机的SNR大于一定阈值 $\gamma_{\text{th}}$ 才可确保通信不中断,这里通过设立通信中断概率作为衡量高空太赫兹通信的可靠性指标<sup>[7]</sup>,则中断概率表示为

$$P_{\text{out}} = \Pr(\gamma_{12f,j} \leq \gamma_{\text{th}}) = \Pr\left(h_a \leq \frac{\gamma_{\text{th}} n_0}{h_{\text{free}}(d_{1,f}, f_{\text{THz}}) h_{\text{mole}}(d_{1,f}, f_{\text{THz}}) W_1}\right) = F_{h_a}\left(\frac{\gamma_{\text{th}} n_0}{\left(\frac{c \sqrt{G_1 G_j}}{4\pi f_{\text{THz}} d_{1,f}}\right)^2 e^{-\alpha d_{1,f}} W_1}\right) \quad (13)$$

其中 $G_1$ 为主机发射的天线增益.

**定理1** 为确保编队中飞机间的通信可靠性,要求飞机间的通信中断概率不小于阈值 $P_{\text{out}}^{\text{th}}$ ,那么高空飞机编队中主机与从机的最远机间通信距离为

$$d_{1,f}^{\text{max}} = g^{-1}\left[\left(\frac{c \sqrt{G_1 G_j}}{4\pi f_{\text{THz}}}\right)^2 \frac{P_1}{\gamma_{\text{th}} n_0} e^{\sigma \sqrt{8} \text{erf}^{-1}[2P_{\text{out}}^{\text{th}} - 1] + \mu}\right] \quad (14)$$

其中 $g^{-1}(\cdot)$ 为函数 $g(d_{1,f}) = d_{1,f}^2 e^{\alpha d_{1,f}}$ 的反函数.

**证明** 要求通信中断概率小于中断阈值 $P_{\text{out}}^{\text{th}}$ ,即 $P_{\text{out}} \leq P_{\text{out}}^{\text{th}}$ ,将式(13)代入 $P_{\text{out}} \leq P_{\text{out}}^{\text{th}}$ ,有

$$F_{h_a}\left(\frac{\gamma_{\text{th}} n_0}{\left(\frac{c \sqrt{G_1 G_j}}{4\pi f_{\text{THz}} d_{1,f}}\right)^2 e^{-\alpha d_{1,f}} P_1}\right) \leq P_{\text{out}}^{\text{th}} \quad (15)$$

继而,将式(7)代入式(15),变换可得

$$\text{erf}\left[\frac{\ln\left(\frac{\gamma_{\text{th}} n_0}{\left(\frac{c \sqrt{G_1 G_j}}{4\pi f_{\text{THz}} d_{1,f}}\right)^2 e^{-\alpha d_{1,f}} P_1}\right) - \mu}{\sigma \sqrt{8}}\right] \leq 2P_{\text{out}}^{\text{th}} - 1 \quad (16)$$

通过化简不等式,可得主从机间的通信距离满足:

$$(d_{1,f})^2 e^{\alpha d_{1,f}} \leq \left(\frac{c \sqrt{G_1 G_j}}{4\pi f_{\text{THz}}}\right)^2 \frac{P_1}{\gamma_{\text{th}} n_0} e^{\sigma \sqrt{8} \text{erf}^{-1}[2P_{\text{out}}^{\text{th}} - 1] + \mu} \quad (17)$$

设函数 $g(d_{1,f}) = d_{1,f}^2 e^{\alpha d_{1,f}}$ ,显然 $g(d_{1,f})$ 是在 $(0, +\infty)$ 上单调递增的函数,则 $g(d_{1,f})$ 存在反函数 $g^{-1}(\cdot)$ .将反函数代入不等式(17)中,有

$$d_{1,f} \leq g^{-1}\left[\left(\frac{c \sqrt{G_1 G_j}}{4\pi f_{\text{THz}}}\right)^2 \frac{P_1}{\gamma_{\text{th}} n_0} e^{\sigma \sqrt{8} \text{erf}^{-1}[2P_{\text{out}}^{\text{th}} - 1] + \mu}\right] \quad (18)$$

最终,可以求出在给定中断概率阈值 $P_{\text{out}}^{\text{th}}$ 下,太赫兹高空通信系统的最大机间通信距离即为 $d_{1,f}^{\text{max}}$ .

## 3 高空编队最优组网部署

高空飞行场景中,要完成编队执行的环境监测任务,需要编队的覆盖面积尽可能大,从而获得更广阔的观察视野,与此同时,要求飞机之间保持编队的几何队形不改变.根据第2节的建模,编队中飞机间的通信以TDMA形式进行,编队的几何队形为适合环境监测任务的菱形.如图2所示,这里以主机的位置建为原点立起极坐标系,则主机位置表示为 $p_1 = [0, 0]$ ;从机的位置按照编队菱形的几何队形依次从右至左排布,且其标号依次递增,那么任意从机 $i$ 的位置表示为 $p_{1,i} = [\rho_i, \theta_i]$ ,且 $\theta_1 < \dots < \theta_5$ .设由编队排布好后各成员间连线组成的菱形几何队形所围成的面积为编队的监测覆盖面积( $S$ ),那么结合余弦公式,编队监测覆盖面积可表示为

$$S = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{1}{2} \|p_1 - p_{1,i}\| \|p_1 - p_{1,i+1}\| \sin \|\theta_i - \theta_{i+1}\| \right) \quad (19)$$

其中: $\|\theta_i - \theta_{i+1}\|$ 为以主机位置为顶点,分别向从机 $i$ 和从机 $i+1$ 引出的射线所组成的夹角的大小.



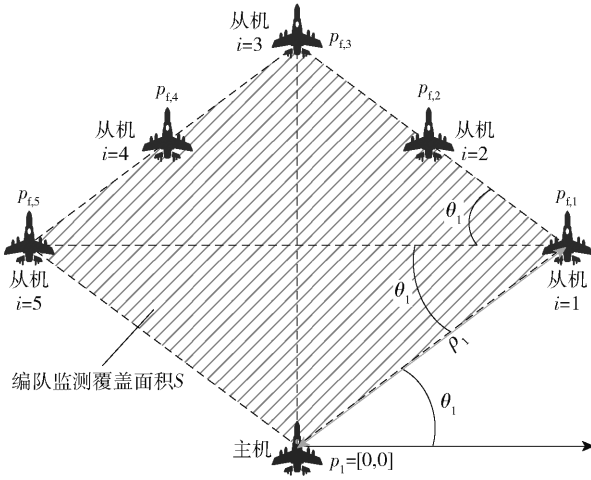


图2 极坐标系下编队成员位置关系

在进行太赫兹高空最优编队设计时,希望编队中的飞机在满足机间避免碰撞的安全距离  $d_s$  和机间最远通信距离  $d_{1,f}^{\max}$  的约束以及编队保持菱形的几何队形约束(关系不变最小刚性图的约束)下,通过给定主机的位置  $p_1$  来优化从机的位置,  $p_f = \{p_{f,1}, p_{f,2}, \dots, p_{f,5}\}$ ,最大化编队的环境观察范围,从而更高效地执行高空任务. 基于高空太赫兹通信系统的高空飞机编队最优部署问题,建模为编队监测覆盖面积最大化问题,优化问题描述为

$$P1: \max_{p_f} S \quad (20)$$

$$\text{s. t. } d_s < \|p_{f,i} - p_{f,j}\|, i, j \in \{1, \dots, 5\} \quad (20a)$$

$$\|p_1 - p_{f,i}\| \leq d_{1,f}^{\max} \quad (20b)$$

$$\mathcal{D}_i = 2, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (20c)$$

$$|\mathcal{E}| = 2M - 3 \quad (20d)$$

$$\|p_i - p_j\| = C \text{ or } C/2, \forall \varepsilon_{ij} \in \mathcal{E} \quad (20e)$$

其中:式(20a)~(20b)为编队所满足的距离约束;式(20c)~(20e)均为控制飞机编队的几何形状要满足保持菱形所建立的关系不变最小刚性图约束. 其中式(20c)、式(20d)表示满足最小刚性图的条件见式(9)、式(10)的约束;式(20e)表示满足刚性图中位置关系不变的条件见式(11)的约束,  $C$  为编队采用的菱形队形的边长.

对优化问题 P1 进行求解,可根据菱形对称性、边长相等、对角线相互平分等一些几何关系,可将优化问题简化,即通过确定编号为  $i=1$  的从机的最优位置  $p_{f,1} = [\rho_1, \theta_1]$ ,进而可获得其他从机的位置,由此可将优化目标即编队监测覆盖的面积重新改写为

$$S = 2\rho_1 \cos \theta_1 \rho_1 \sin \theta_1 = \rho_1^2 \sin 2\theta_1 \quad (21)$$

结合几何关系也可将优化问题 P1 进一步改写为

$$P2: \max_{[\rho_1, \theta_1]} S \quad (22)$$

$$\text{s. t. } 2d_s \leq 2\rho_1 \cos \theta_1 \leq d_{1,f}^{\max} \quad (22a)$$

$$2d_s \leq \rho_1 \leq d_{1,f}^{\max} \quad (22b)$$

$$0 < \theta_1 \leq \frac{\pi}{4} \quad (22c)$$

根据目标函数单调递增的性质,可求得最大的编队监测覆盖面积为

$$S_{\max} = \left( \frac{\sqrt{2}}{2} d_{1,f}^{\max} \right)^2 \sin \left( 2 \frac{\pi}{4} \right) \quad (23)$$

最后求解 P2 可获得编队中所有飞机的最优位置部署:

$$\left. \begin{aligned} p_{f,1}^* &= [\rho_1^*, \theta_1^*] = \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} d_{1,f}^{\max}, \frac{\pi}{4} \right] \\ p_{f,2}^* &= [\rho_2^*, \theta_2^*] = \left[ \frac{\sqrt{5}}{2} d_{1,f}^{\max}, \frac{\pi}{4} + \arctan \frac{1}{2} \right] \\ p_{f,3}^* &= [\rho_3^*, \theta_3^*] = \left[ d_{1,f}^{\max}, \frac{\pi}{2} \right] \\ p_{f,4}^* &= [\rho_4^*, \theta_4^*] = \left[ \frac{\sqrt{5}}{2} d_{1,f}^{\max}, \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{1}{2} \right] \\ p_{f,5}^* &= [\rho_5^*, \theta_5^*] = \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} d_{1,f}^{\max}, \pi - \frac{\pi}{4} \right] \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

## 4 仿真结果

在仿真中,设置飞机编队位于海拔 10 km 的高空,此处的大气压强为 26 440 Pa,温度为  $-50^\circ\text{C}$  ( $T = -50 + 273.15\text{K}$ ),  $B$  为太赫兹频率窗口对应的带宽. 其他参数设置如表 1 所示<sup>[12]</sup>. 仿真所选取的频率为 0.3 ~ 1 THz 内吸收损耗较小的 5 个窗口,具体数值如表 2 所示,其中太赫兹吸收系数  $\alpha$  由文献[8]中的实验数据得到,  $k$  为玻尔兹曼常数 ( $k = 1.381 \times 10^{-23}$ ).

表1 基本仿真参数

参数	值
大气湍流 PDF 参数 $\sigma$	0.5
主机发送功率 $W_1/W$	50
噪声功率 $n_0$	$n_0 = NkTB, N = 8 \text{ dB}$

首先,仿真实验验证了 2.2 节中所推导的高空太赫兹通信中断概率的正确性. 通信 SNR 阈值  $\gamma_{th}$  取 5 dB,在表 2 所示的太赫兹通信频率 ( $f_{\text{THz}}$ ) 下,主机与从机之间的距离  $d_{1,f}$  与通信中断概率  $P_{out}$  之间的关系如图 3 所示. 从图 3 可以看出,一方面中断概

表 2 线谱吸收系数

太赫兹频率/GHz	衰减值/(dB·km <sup>-1</sup> )	$\alpha$	$B/\text{GHz}$
340	22.5	5.180 8	45
410	32.6	7.506 4	45
500	64.3	14.805 6	39
670	79.1	18.213 4	77
840	100.0	23.025 9	45

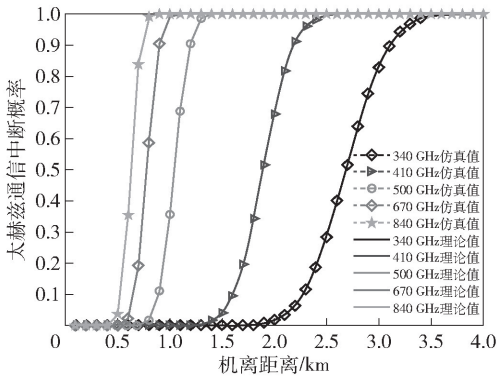


图 3 机间距离与通信中断概率阈值

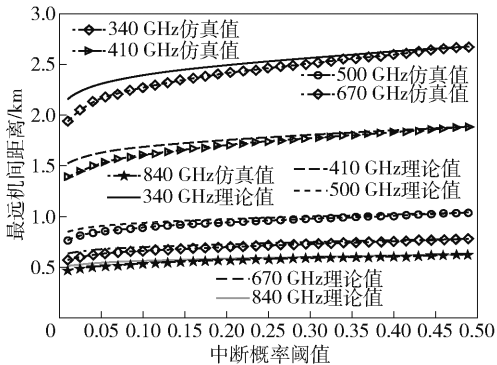


图 4 通信中断概率阈值设置与最远机间距离

率的理论推导与仿真相吻合；另一方面，当机间距离较近时，通信基本不产生中断；随着机间距离增大，通信中断概率越来越大直至飞机之间完全无法进行通信。此外，随着通信距离的增加， $f_{\text{THz}}$  越大通信中断概率上升越快。这是因为根据高空太赫兹通信信道的建模式(8)可知，相同频率下自由空间传播信道增益与通信距离的方呈反比关系，以及太赫兹大气损耗所产生的信道增益会随通信距离的增加而呈负指数衰减，两者共同加剧了太赫兹信道传播损耗以至通信无法满足 SNR 要求。同时，根据式(1)、式(4)、式(5)，即使通信距离相同，自由空间传播损耗与  $f_{\text{THz}}$  呈平方反比衰减、太赫兹大气损耗与距离呈指数衰减，因此  $f_{\text{THz}}$  选取越大，在这两方面的衰减作

用下，通信距离的小幅度增加都会使得通信可靠性能急剧降低。

然后，将太赫兹通信的中断概率阈值  $P_{\text{out}}^{\text{th}}$  设置在  $0.01 \sim 0.5$  [7]，比较表 2 所示的 5 种不同  $f_{\text{THz}}$  下的最远机间距离的变化情况。从图 4 可以看出，最大机间通信距离的理论推导与仿真真相吻合，相同频率下随着通信可靠性标准的降低，最远机间通信距离呈现递增的趋势，这验证了最远机间通信距离  $d_{\text{l,f}}^{\text{max}}$  随着中断概率阈值  $P_{\text{out}}^{\text{th}}$  的函数递增关系（见式(14)）。同时在相同中断概率阈值下，由于  $f_{\text{THz}}$  增加会造成信道的严重衰减，最远机间距离  $d_{\text{l,f}}^{\text{max}}$  会随着  $f_{\text{THz}}$  的增加而明显减小。因此，飞机编队在采用较高的太赫兹频率进行通信时，需要牺牲编队成员间的部署距离，以达到相同的通信稳定性指标。

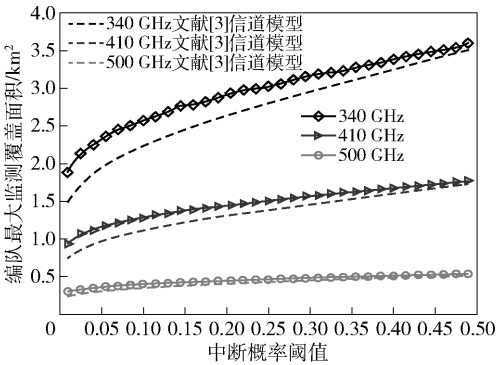


图 5 不同中断概率阈值下的编队最大监测面积

最后，通过仿真验证了编队最大监测覆盖面积  $S_{\text{max}}$  随 340, 410, 500 GHz 这 3 种不同  $f_{\text{THz}}$  下的变化情况。从图 5 可以看出，随着通信中断概率阈值  $P_{\text{out}}^{\text{th}}$  的增大，编队的最大监测覆盖面积  $S_{\text{max}}$  也随之增加。这同样是由于对当对通信的可靠性要求降低时，最大机间通信距离随之变远，飞机间的位置排布约束随之放宽从而使得编队几何队形覆盖面积  $S_{\text{max}}$  扩大。另外，同等通信可靠性指标下，即同样的中断概率阈值  $P_{\text{out}}^{\text{th}}$  下，最远机间通信距离  $d_{\text{l,f}}^{\text{max}}$  随着  $f_{\text{THz}}$  增大而减小，由此编队的最大监测覆盖面积  $S_{\text{max}}$  也随之减小，这主要是因为高空太赫兹信道模型中信道增益会随着太赫兹频率选取的增大而急剧衰减。为满足同样的通信可靠性指标，在高频率下只能通过减小飞机间的通信距离使得通信中断概率不小于阈值  $P_{\text{out}}^{\text{th}}$ ，这样飞机间的距离排布有所靠近最终使得编队的监测覆盖面积也随之减小。另外，在图 5 所示的仿真中还比较了  $f_{\text{THz}}$  在 340 GHz 下使用文献[3]中太赫兹信道模型的编队部署情况，如表 3 所示。可

以明显看出,在使用这样没有全面考虑太赫兹波在高空传播特性的信道下进行编队部署,其最大监测覆盖面积( $S_{\max}$ )明显小于所建立的信道模型下的最优部署结果.且对比之下,在全面考虑太赫兹波的传播特性后,运用所建立的太赫兹信道模型求解编队最优部署,对于编队优化部署的目标即最大监测覆盖面积,在3个频率下,最大监测覆盖面积分别平均提升了8.7%,9.2%,7.7%.这是因为所对比使用的信道模型较为理想,信道衰减没有考虑到高空大气湍流的影响,信道衰减低于实际值,使得机间最远通信距离偏高,从而无法达到既定的可靠性指标 $P_{\text{out}}^{\text{th}}$ ,最终使得编队最优部署下的最大编队监测面积偏小,从而满足中断概率阈值的要求.

表3 最大监测覆盖面积 $S_{\max}$ 与文献[3]对比情况

太赫兹频率/ GHz	$S_{\max}$ 平均提升比值/ $\text{km}^2$	$S_{\max}$ 平均提升比率/ %
340	0.235 6	8.7
410	0.126 6	9.2
500	0.032 5	7.7

## 5 结束语

针对高空太赫兹通信系统下的飞机编队组网问题,根据所提出的太赫兹高空传播信道模型,给出了基于监测任务的混合飞机编队最优部署.通过仿真实验验证了不同太赫兹频率下的最远机间距离与通信中断概率阈值间的关系,对高空编队的最佳部署进行了求解和对比,为未来高空高速太赫兹通信系统的组网提供了有效的支撑方案.

### 参考文献:

- [1] Suri N, Fronteddu R, Cramer E, et al. Experimental evaluation of group communications protocols for tactical data dissemination[C]//MILCOM 2018-2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). [S. l.]: IEEE, 2018: 133-139.
- [2] Chen Zhi, Ma Xinying, Zhang Bo, et al. A survey on Terahertz communications[J]. China Communications, 2019, 16(2): 1-35.
- [3] Mendrzik R, Cabric D, Bauch G. Error bounds for Terahertz MIMO positioning of swarm UAVs for distributed sensing[C]//2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). [S. l.]: IEEE, 2018: 1-6.
- [4] 杨晓帆,王亚华,曾勇虎,等.飞行器太赫兹波斜路径地面探测大气吸收衰减[J].微波学报,2016,32(S2):407-410.  
Yang Xiaofan, Wang Yahua, Zeng Yonghu, et al. Aircraft THz wave slant path ground detection atmospheric absorption attenuation[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(S2): 407-410.
- [5] Zhang Jialong, Yan Jianguo, Zhang Pu. Multi-UAV formation control based on a novel back-stepping approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 2437-2448.
- [6] 游尧.面向无人机编队空面任务的CNN/BN参数学习与决策方法研究[D].长沙:国防科技大学,2017.
- [7] Boulogeorgos A A A, Papasotiriou E N, Alexiou A. Analytical performance assessment of THz wireless systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 11436-11453.
- [8] 王玉文,董志伟,李瀚宇,等.典型大气窗口太赫兹波传输特性和信道分析[J].物理学报,2016,65(13):134101.  
Wang Yuwen, Dong Zhiwei, Li Hanyu, et al. Atmospheric window characteristic and channel capacity of THz wave propagation[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(13): 134101.
- [9] Taherkhani M, Kashani Z G, Sadeghzadeh R A. On the performance of THz wireless LOS links through random turbulence channels[J]. Nano Communication Networks, 2020, 23: 100282.
- [10] 施书成.无人机多机编队飞行控制技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2019.
- [11] Yu Dengxiu, Chen C L P. Automatic leader-follower persistent formation generation with minimum agent-movement in various switching topologies[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(4): 1569-1581.
- [12] Jornet J M, Akyildiz I F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the Terahertz band[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3211-3221.