

## 定向毫米波网络邻居发现协议

梁仕杰<sup>1,2</sup>, 赵海涛<sup>2\*</sup>, 张姣<sup>2</sup>, 陈海涛<sup>2</sup>, 魏急波<sup>2</sup>, 王俊芳<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北石家庄 050081;

2. 国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**针对定向毫米波网络各节点间无波束方向先验信息导致邻居发现困难的问题,提出了一种基于盲交汇算法的邻居发现协议,推导了邻居发现过程中时隙长度、波束个数与邻居发现时间之间的理论关系。进一步,为了缩短邻居发现的时间,在盲交汇算法的邻居发现协议的基础上,提出了基于位置预测的邻居发现协议。仿真结果表明,基于盲交汇算法的邻居发现协议的最长邻居发现时间小于无协调的定向邻居发现协议,波束个数  $N$  接近  $2^n$  ( $2^{n-1} < N \leq 2^n, n > 1, n \in \mathbf{Z}$ ) 时,平均邻居发现时间低于无协调的定向邻居发现算法。此外,基于位置预测的邻居发现协议可以有效缩短邻居发现时间。

**关键词:**毫米波;盲交汇;邻居发现;MAC协议

中图分类号:TN914 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2024)01-160-10



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Protocol of neighbor discovery in directional millimeter wave wireless networks

LIANG Shijie<sup>1,2</sup>, ZHAO Haitao<sup>2\*</sup>, ZHANG Jiao<sup>2</sup>, CHEN Haitao<sup>2</sup>, WEI Jibo<sup>2</sup>, WANG Junfang<sup>1</sup>

(1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China;

2. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that it is difficult to discover neighbors without prior information of sector direction between nodes in the directional millimeter wave network, a neighbor discovery protocol base on blind rendezvous algorithm was proposed and the theoretical relationship among slot length, the number of sectors and the time of neighbors discovery was derived. Furthermore, in order to shorten the time of neighbor discovery base on blind rendezvous algorithm, a neighbor discovery protocol based on location prediction was proposed. Simulation results showed that the longest discovery time of neighbor discovery protocol base on blind rendezvous algorithm is less than that of ODND (oblivious directional neighbor discovery) protocol and average discovery time of neighbor discovery protocol base on blind rendezvous algorithm is less than ODND protocol when the number of sectors  $N$  is close to  $2^n$  ( $2^{n-1} < N \leq 2^n, n > 1, n \in \mathbf{Z}$ ). In addition, neighbor discovery protocol based on location prediction can effectively shorten neighbor discovery time.

**Keywords:** millimeter wave; blind rendezvous; neighbor discovery; MAC protocol

随着5G移动通信、物联网与人工智能等技术的快速发展,增强/虚拟现实、自动驾驶、自然语言等新型资源密集型应用迅速占领移动互联网市场,这些应用往往需要进行高速率的连续采样与传输,对现有的通信资源提出了极大的挑战。毫米波具有大量可用频段,可作用于带宽密集型应用<sup>[1-3]</sup>。因此,近年来越来越多的研究人员将研究方向转向毫米波通信的研究。

毫米波通信的研究潜力巨大,但广泛的应用仍面临很多的挑战。毫米波通信的衰减要比S波

段、C波段等低频段严重<sup>[4]</sup>。因此,一般要采用定向天线(相控阵天线)来对抗信号的高衰减特性,从而实现高速率的传输<sup>[5-6]</sup>。

在定向无线网络中,快速高效的邻居发现是个重要问题。目前,定向毫米波通信主要采用全向天线辅助进行邻居发现<sup>[7-9]</sup>。然而,全向天线的增益小于定向天线的增益,导致全向和定向的通信距离不同,因此采用全向天线辅助邻居发现的方法会导致某些邻居无法被发现。而且,基于全向天线辅助的方法还要求通信节点具备额外的

全向射频模块。如何单纯利用节点已经具备的定向通信能力完成邻居发现就成为一个亟待解决的问题。

采用纯定向的邻居发现协议,可以分为随机类和确定类。随机类邻居发现算法<sup>[10-12]</sup>随机选择一个定向天线的波束指向方向,具有无记忆、平稳和健壮性的优势,可以用于没有任何先验信息和同步信息的环境中。但是,该算法得到的系统性能没有上界,导致其可能会需要非常长的邻居发现时间。确定类邻居发现协议<sup>[13-18]</sup>按照事先预定好的序列切换天线的方向或波束搜索方式实现波束交汇和邻居发现,有邻居发现时间的上界。

根据收发端时间的同步性,定向邻居发现协议还分为同步类邻居发现协议和异步类邻居发现协议。同步类邻居发现协议<sup>[19-20]</sup>需要收发双方的同步信息。异步类邻居发现协议<sup>[21-22]</sup>不需要双方的同步信息,但是发现时间会变长。

在定向的毫米波网络中,邻居发现阶段各个节点可能没有任何邻居交互信息。因此一个很重要的问题是如何在没有公共控制信道和任何先验信息的情况下发现邻居。定向通信的邻居发现需要收发双方的波束交汇,因此在没有公共控制信道和任何先验信息的条件下如何引导波束转向,实现收发双方的波束交汇是一个重要的课题。定向波束的邻居发现本质上是一个交汇(rendezvous)问题<sup>[23]</sup>,当两节点的定向波束均指向对方并建立通信链路实现信号的发送与接收时,才可以实现邻居发现。在没有交互信息的情况下实现定向通信的邻居发现是一个盲交汇(blind rendezvous)问题<sup>[17-18, 23]</sup>。文献[17]提出了无协调定向邻居发现(oblivious directional neighbor discovery, ODND)协议,该协议能够在没有任何先验信息的条件下实现波束盲交汇并完成邻居发现,但问题是邻居发现时间较长。为了缩短 ODND 协议中的邻居发现时间,文献[18]进一步提出了基于连续扫描定向天线模型的波束盲交汇算法,并根据该算法设计出基于搜索的定向邻居发现(hunting-based directional neighbor discovery, HDND)协议实现邻居发现。然而,HDND 协议的连续扫描定向天线模型较为理想,在工程中难以实现<sup>[24]</sup>。

本文提出了一种异步的确定性的基于盲交汇算法的邻居发现协议。该协议不需要任何交互信息,并且在首次基于盲交汇算法的邻居发现协议后执行基于位置预测的邻居发现协议来提高后续邻居发现速度,大量仿真实验验证了本文所提方法的有效性。

## 1 定向邻居发现盲交汇问题描述

邻居发现是实现网络媒体访问控制、拓扑控制等功能的关键技术之一。定向通信的邻居发现和全向通信的邻居发现不同,定向通信只能覆盖一个方位角,因此其邻居发现的复杂性远大于全向天线的邻居发现。在实际环境中,节点之间可能是异步的,邻居发现协议应该在没有任何公共控制信道和先验信息的情况下实现邻居发现。

定向通信邻居盲交汇问题定义为:在没有任何公共控制信道和先验信息,且没有任何时钟同步的情况下,实现有界的定向通信邻居发现。

### 1.1 系统模型

在一个二维毫米波定向通信网络中,每个节点配备定向天线,并且只在一个频段运行,每个天线可以切换方向到需要的位置。每个节点有  $N$  个( $N$  为正整数)波束,忽略波束的切换时间,经过  $N$  次切换可以扫描所有的方向。每个波束的夹角为  $2\pi/N$ ,当波束夹角为  $2\pi$  时,其退化成全向天线。

定向通信首先要保证发射端和接收端的波束交汇。为了便于说明,下面通过一个例子来描述定向通信波束交汇的过程,如图 1 所示。节点  $A$  和节点  $B$  均采用定向通信,它们均有 6 个波束,编号顺序按照逆时针编号,记为  $u = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ,每个波束的夹角为  $\pi/3$ 。节点  $A$  和节点  $B$  在彼此的定向-定向的通信范围内,彼此进行邻居发现需要双方波束同时指向对方(波束交汇)。

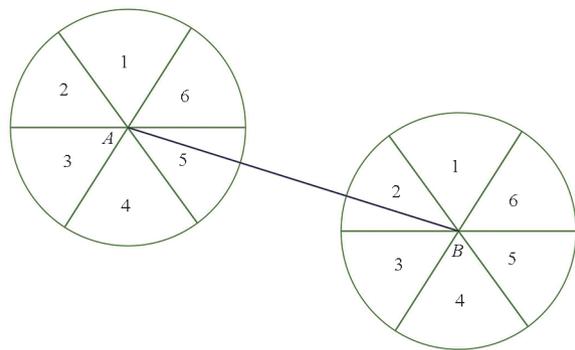


图1 天线波束模型

Fig. 1 Sectors of antenna model

假设节点  $A$  和节点  $B$  均按照逆时针方向旋转且时间同步,当前节点  $A$  指向波束 4 的方向记作  $P_A = 4$ ,节点  $B$  指向波束 3 方向记作  $P_B = 3$ 。假设节点  $A$  指向波束 1,节点  $B$  指向波束 4 才能实现邻居发现,记作  $(d_{A-B} = 1, d_{B-A} = 4)$ 。若节点  $A$  和节点  $B$  按照逆时针顺序切换下一个波束,

根据  $P_A, N$  可以得到节点  $A$  的扫描序列  $u_A$ 。根据  $P_B, N$  可以得到节点  $B$  的扫描序列  $u_B$ 。

$$u_A = \{4, 5, 6, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 1, 2, 3, \dots\} \quad (1)$$

$$u_B = \{3, 4, 5, 6, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 1, 2, \dots\} \quad (2)$$

根据扫描序列  $u_A$  和  $u_B$  按照每个时隙切换一次,如图 2 所示。

节点A	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
节点B	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2

图 2 节点  $A$  和节点  $B$  波束扫描序列图

Fig. 2 Beam scan sequences of node  $A$  and node  $B$

通过图 2 中的  $u_A$  和  $u_B$  可以得知:在这种情况下两个节点只能搜索出  $\{(d_{A-B} = 1, d_{B-A} = 6)(d_{A-B} = 2, d_{B-A} = 1)(d_{A-B} = 3, d_{B-A} = 2)(d_{A-B} = 4, d_{B-A} = 3)(d_{A-B} = 5, d_{B-A} = 4)(d_{A-B} = 6, d_{B-A} = 5)\}$  六组解,无法搜索到  $(d_{A-B} = 1, d_{B-A} = 4)$  这个解;无法实现节点  $A$  指向波束 1 同时节点  $B$  指向波束 4,无法实现邻居发现。两个节点波束个数均为 6 时,共有 36 种交汇情况,因而无法搜索到所有解。

## 1.2 问题模型

在上述例子中,仍然存在一些无法完成波束交汇的情况。因此定向天线邻居发现盲交汇算法需要满足以下要求:

**保证交汇:**在有限的时间范围内,保证两个节点实现波束交汇。

**全交汇:**两个用户初始指向任何方向、交汇方向为任意方向,都可以保证波束交汇。

**异步交汇:**收发双方不需要时钟同步,也可完成盲交汇。

**交汇时间:**波束交汇必须至少保持一个时隙  $T$ (假设收发节点完成一次邻居发现时间为  $T$ )才能实现邻居发现。

在毫米波网络中,节点可能是不断移动的,因此两个节点交汇的方向  $d_{A-B}$  和  $d_{B-A}$  可能是任意组合,即  $\forall d_{A-B} \in [1, N], d_{B-A} \in [1, N]$ ,其初始波束的位置也是随机的,即  $\forall P_A \in [1, N], P_B \in [1, N], u_a$  表示节点  $A$  根据  $P_A$  和  $N$  生成的序列,  $u_b$  是节点  $B$  根据  $P_B$  和  $N$  生成的序列,因此定向天线的盲交汇数学优化问题为:

$$\begin{aligned} & \min T_{br} \\ & \text{s. t. } \forall d_{A-B} \in [1, N], d_{B-A} \in [1, N], \\ & \quad \forall P_A \in [1, N], P_B \in [1, N] \\ & \quad \exists t \leq T_{br}, u_a(t) = d_{A-B}, u_b(t) = d_{B-A} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)表示的意思是:通过设计节点  $A$  的扫

描序列  $u_a$  和节点  $B$  的扫描序列  $u_b$  最小化全交汇时间,保证节点  $A$  和节点  $B$  当前任意波束指向的组合  $(P_A, P_B) \in [1, N] \times [1, N]$ ,节点  $A$  和节点  $B$  波束交汇的组合  $(d_{A-B}, d_{B-A}) \in [1, N] \times [1, N]$ ,可以使节点  $A$  和节点  $B$  在  $t \leq T_{br}$  时刻分别指向  $d_{A-B}$  和  $d_{B-A}$  从而实现节点  $A$  和节点  $B$  的波束交汇。

## 2 基于位置预测的邻居发现算法

### 2.1 定向波束盲交汇算法

受圆形钟表的时分速率不同但终会相交这一现象启发,文献[25]提出了一种信道跳变的盲交汇算法,解决了无先验频谱信息条件下的多信道接入与通信问题。基于该思想,本文提出了一种定向天线波束盲交汇算法,该算法的主要思想是收发两端无公共波束信息,但在周期性定向旋转过程中仍然会实现波束交汇。但是,波束盲交汇算法和信道盲交汇算法仍然存在不同之处。在信道盲交汇过程中两个节点可用信道相同,信道个数为  $P$ 。信道盲交汇满足两个节点在同一时刻处于共同可用的任意一个信道中,也就是说在所有信道均可用的情况下共有  $P$  种解,即  $\{(1, 1), (2, 2), (3, 3), \dots, (P-1, P-1), (P, P)\}$ 。波束盲交汇指的是两个节点的波束必须指向对方,在该时刻只有  $(d_{A-B}, d_{B-A})$  一个解。

两个节点按照逆时针的方向切换波束来扫描所有方向,设发送端在每个方向停留的时间为  $M_T T$ ,接收端在每个方向停留的时间为  $M_R T$ 。 $M_T$  和  $M_R$  为整数且互质,即  $\gcd(M_T, M_R) = 1$ 。

**定理 1** 两个用户在进行波束交互时,两个节点完成一个周期搜索的时间为  $M_T M_R N T$ 。在一个周期内,两个节点可以搜索完一次所有波束交汇的可能性,并在下一次搜索同时回到搜索初始波束位置。

**证明:**发射端经过  $M_T N T$  时间完成一次所有方向的扫描。接收端经过  $M_R N T$  完成所有方向的扫描。接收端和发射端扫描完所有方向,并到达共同扫描的初始位置时,发射端和接收端组成的系统实现了一个周期的扫描。那么该系统的一个周期为  $M_T N T$  和  $M_R N T$  的最小公倍数,即  $M_T M_R N T$ 。□

**定理 2** 在同步状态下,只有在  $(M_T = 1, M_R = N)$  或  $(M_T = N, M_R = 1)$  条件下才能在最短的时间内实现全交汇,最短全交汇时间为  $N^2 T$ ,最小盲交汇时间的上界为  $N^2 T$ 。

证明:两个用户的波束个数均为  $N$ ,那么两个用户波束交汇的情况共有  $N^2$  种,因此要实现全交汇即遍历所有情况,就需要搜索至少  $N^2$  次,即  $M_T M_R N T \geq N^2 T$ 。那么,  $M_T M_R \geq N$ 。若在同步状态下要实现最小全交汇时间,那么搜索  $N^2$  次就要搜索到所有的情况,即  $M_T M_R = N$ 。在满足  $M_T M_R = N$  情况下,若  $M_T \neq 1$  且  $M_R \neq N$  或者  $M_T \neq N$  且  $M_R \neq 1$ ,则不能实现全交汇。在  $(M_T \neq 1, M_R \neq N)$  或  $(M_T \neq N, M_R \neq 1)$  条件下,由于  $M_T \geq 2$  且  $M_R \geq 2$ ,并且  $M_T \neq M_R$ ,在两个连续的时间  $T$  内,一定会出现发送端波束和接收端波束在这两个  $T$  内均相同的情况。因此,在  $M_T M_R N T$  的时间内,至少有  $\frac{M_T M_R N}{\max(M_T, M_R)}$  种情况没有搜索到,至少需要再搜索  $\min(M_T, M_R) N T$  的时间,因此只有在  $(M_T = 1, M_R = N)$  或者  $(M_T = N, M_R = 1)$  条件下才能在最短的时间内实现全交汇,最短全交汇时间为  $M_T M_R N T$ 。在  $(M_T = 1, M_R = N)$  或者  $(M_T = N, M_R = 1)$  条件下,可以实现最小盲交汇时间上界,最小盲交汇时间的上界为  $N^2 T$ 。 □

在 1.1 节列举的波束交汇场景中,若令  $(M_T = 2, M_R = 3)$ ,其波束扫描序列如图 3 所示,在这种情况下无法搜索到  $(d_{A-B} = 1, d_{B-A} = 4)$ 。若令  $(M_T = 1, M_R = 6)$ ,其波束扫描示意图如图 4 所示,在时隙 9 就可以搜索到  $(d_{A-B} = 1, d_{B-A} = 4)$  的情况从而实现波束交汇。在图 4 中,经过 36 个时隙的时间,  $(M_T = 1, M_R = 6)$  条件下可以遍历所有波束交汇,实现全交汇。该场景收发双方的波束个数为 6,至少经过  $36T$  的时间才能实现全交汇,  $(M_T = 1, M_R = 6)$  时可以实现全交汇最短全交汇时间。

时隙号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
节点A	4	4	5	5	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6
节点B	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	1	1	1	2	2	2

时隙号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
节点A	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	1	1	2	2	3	3
节点B	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	1	1	1	2	2	2

图 3  $N=6, (M_T=2, M_R=3)$  时节点 A 和节点 B 波束扫描序列

Fig. 3 Beam scan sequence of node A and node B when  $N=6, (M_T=2, M_R=3)$

**定理 3** 在异步状态下,只有  $(M_T = 1, M_R = N + 1)$  或者  $(M_T = N + 1, M_R = 1)$  条件下才能在最短的时间内实现全交汇,最短全交汇时间为  $N(N + 1)T$ ,最小盲交汇时间的上界为  $N(N + 1)T$ 。

时隙号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
节点A	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
节点B	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5

时隙号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
节点A	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
节点B	6	6	6	6	6	6	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2

图 4  $N=6, (M_T=1, M_R=6)$  时节点 A 和节点 B 波束扫描序列

Fig. 4 Beam scan sequence of node A and node B when  $N=6, (M_T=1, M_R=6)$

证明:在同步状态下,在最小最大交汇时间内无法在异步状态下实现全交汇,这是因为一定会存在若干个情况由于持续时间小于  $T$  从而导致无法实现波束盲交汇。由于一个搜索周期为  $N^2 T$ ,在  $N^2 T$  时间内有些情况搜索不到将会导致这些情况永远无法搜索到。在同步状态下  $(d_{A-B} = 1, d_{B-A} = 4)$ 、 $(d_{A-B} = 3, d_{B-A} = 6)$  均可以搜索到并保持一个时隙,如图 5 所示。在异步状态下,  $(d_{A-B} = 1, d_{B-A} = 4)$  持续时间大于一个时隙,  $(d_{A-B} = 3, d_{B-A} = 6)$  持续时间小于一个时隙,无法实现异步状态下的全交汇,如图 6 所示。 □

时隙号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
节点A	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
节点B	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5

时隙号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
节点A	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
节点B	6	6	6	6	6	6	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2

图 5 同步状态且  $N=6$  时依据定理 2 设计的波束扫描序列

Fig. 5 Beam scan sequence according to theorem 2 when the system is synchronous and  $N=6$

时隙号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
节点A	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
节点B	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5

时隙号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
节点A	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3
节点B	6	6	6	6	6	6	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2

图 6 异步状态且  $N=6$  时依据定理 2 设计的波束扫描序列

Fig. 6 Beam scan sequence according to theorem 2 when the system is asynchronous and  $N=6$

令  $(M_T = 1, M_R = N + 1)$  或  $(M_T = N + 1, M_R = 1)$ ,节点 A 搜索完毕所有方向后,节点 B 在节点 A 的每个方向持续时间均大于  $T$ 。因此,盲交汇消耗时间为  $N(N + 1)T$ 。在定理 2 中,在  $(M_T \neq 1, M_R \neq N)$  或者  $(M_T \neq N, M_R \neq 1)$  条件下,最短全交汇时间为  $\min(M_T, M_R) \cdot NT + N^2 T$ ,在异步状态

下最短全交汇时间至少为  $\min(M_T, M_R) \cdot NT + N^2T$ 。由于  $\min(M_T, M_R) \cdot NT + N^2T$  大于  $N(N+1)T$ ，因此在异步状态下， $(M_T = 1, M_R = N+1)$  或  $(M_T = N+1, M_R = 1)$  条件下才能在最短的时间内实现全交汇，最短全交汇时间为  $N(N+1)T$ 。在异步状态下， $(M_T = 1, M_R = N+1)$  或  $(M_T = N+1, M_R = 1)$  条件下可以实现最小盲交汇时间的上界，最小盲交汇时间的上界为  $N(N+1)T$ 。

在图 7 中，依据定理 3 设计的波束扫描序列可以搜索到  $(d_{A-B} = 3, d_{B-A} = 6)$  和  $(d_{A-B} = 1, d_{B-A} = 4)$  并保持一个时隙，改变了图 6 中某些异步状态搜索不到的情况。

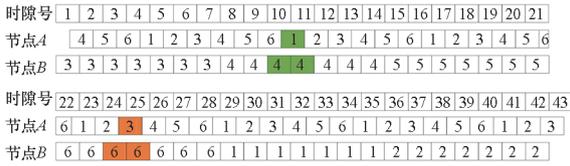


图 7 异步状态且  $N=6$  时依据定理 3 设计的波束扫描序列

Fig. 7 Beam scan sequence according to theorem 3 when the system is asynchronous and  $N=6$

在两个节点进行波束交汇时，同步状态下盲交汇的最短时间为  $T$ ，盲交汇的最长时间为  $N^2T$ 。因此，两个节点的同步状态下的盲交汇平均时间如式(4)所示，其中  $\mathbf{Z}$  表示整数， $i$  和  $j$  表示进行  $i$  次全方向搜索并在下一个全方向搜索  $j$  次可以实现波束交汇。

$$T_{\text{Sy-Bave}} = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i \in [0, N-1] \cup \mathbf{Z} \\ j \in [1, N] \cup \mathbf{Z}}} (iN + j)T = \frac{1 + N^2}{2}T \quad (4)$$

在异步状态下两个节点在进行波束交汇时，盲交汇最小时间为  $2T$ ，盲交汇最大时间为  $N(N+1)T$ ，因此在异步状态下的平均盲交汇时间如式(5)所示。

$$T_{\text{ANSy-Bave}} = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i \in [0, N-1] \cup \mathbf{Z} \\ j \in [2, N+1] \cup \mathbf{Z}}} (iN + j)T = \frac{N^2 + N + 2}{2}T \quad (5)$$

### 2.2 基于盲交汇算法的邻居发现协议

在利用 2.1 节实现波束交汇后，需要两个节点执行邻居发现协议实现邻居发现。

两个用户发射一个波束对准请求发送 (beam alignment request to send, BARTS) 的时间定义为  $T_{\text{T-BARTS}}$ ，接收一个波束对准允许发送 (beam alignment clear to send, BACTS) 的时间为  $T_{\text{T-BACTS}}$ ，将时间  $T$  定义为：

$$T \geq 2(T_{\text{T-BARTS}} + T_{\text{T-BACTS}}) \quad (6)$$

BARTS 和 BACTS 数据包的数据结构如图 8 所示，其中 Type 表示帧类型，0 表示控制帧，1 表示数据帧；Subtype 表示子类型，在这里表示 BARTS 数据包或者 BACTS 数据包；ID 表示发射数据包节点的 ID 号；Location 数据表示发射数据包节点从 GPS 导航中获取的位置信息；Time 表示发射数据包节点的时钟同步信息；Speed 表示发射节点的速度信息；Direction 表示当前该节点指向的方向。

Type	Subtype	ID	Location	Time	Speed	Direction
------	---------	----	----------	------	-------	-----------

图 8 BARTS 和 BACTS 结构

Fig. 8 Structure of BARTS and BACTS

本文采用文献[16]的邻居发现协议，其主要的流程如下：若节点处于发射状态，那么其在该时隙的开始阶段发射一个 BARTS 数据包，在结束阶段发射一个 BACTS 数据包；若处于接收状态，在开始阶段发射一个 BACTS 数据包，在结束阶段发射一个 BACTS 数据包。文献[16]证明，该方法可以在异步状态下保证邻居发现。

邻居发现需要保证波束交汇的一个时隙内一个节点处于接收状态，一个节点处于发射状态。在没有过任何信息交互的情况下，很难保证在一个时隙内一个节点处于接收状态同时另一个节点处于发射状态。文献[17-18, 26]提出了一种序列解决了这个问题，确保两个用户处于不同的状态，即一个用户处于发射状态另一个用户处于接收状态。该序列长度为  $L$ ，组成方式为  $0(l_1) \| ID \| 1(l_2)$ ，其中  $0(l_1)$  表示  $l_1$  个连续的 0， $1(l_2)$  表示  $l_2$  个连续的 1， $ID$  表示该节点长度为  $l_0$  的 ID 号，ID 号为二进制序列， $\|$  表示拼接符。本文采用文献[17]设计的序列， $l_0 + 1 = l_1 + l_2$ ， $L = 2l_0 + 1$ 。例如 ID 号为 01010， $l_1$  为 3， $l_2$  为 3，那么  $0(l_1) \| ID \| 1(l_2)$  为 00001010111。在文献[17-18, 26]中证明了两个以不同 ID 号生成的序列保证两个节点在  $L$  个连续位内任意循环位移，至少在 1 bit 持续时间内处于不同状态。令 1 bit 的持续时间为 2.1 节中的一个搜索周期  $T_{\text{research}}$ 。当节点序列号为 0 时，该节点处于接收状态，当节点序列号为 1 时，该节点处于发射状态，这样便可以保证一个节点处于发射状态，一个节点处于接收状态。

### 2.3 基于位置预测的邻居发现协议

通过 2.1 节和 2.2 节的协议实现全网邻居发现后，每个节点可以发现本节点的邻居和本

节点邻居的 ID 号、位置、速度、方向和时钟同步信息。

通过这些信息,可以加快后续节点的邻居发现,其中第  $i$  个用户的位置为  $(x_i, y_i)$ ,速度为  $v_i$ ,其运动方向与  $x$  轴正向的夹角为  $\theta_i$ ,节点发射上述信息的时间为  $t_i$ 。在  $t_j$  时刻,节点  $j$  准备向节点  $i$  发射信息,此时节点  $i$  的位置表示为:

$$\begin{cases} x'_i = x_i + v_i(t_j - t_i) \cos\theta_i \\ y'_i = y_i + v_i(t_j - t_i) \sin\theta_i \end{cases} \quad (7)$$

任意一个节点  $A$  在准备和其他用户  $B$  进行通信时,采用式(7)对其位置进行预测,直接对节点  $B$  的方向发射请求发送(request to send, RTS)数据包。RTS 的数据包结构如图 9 所示。Type, Location, Time, Speed 和 Direction 表示的含义与 BARTS 数据包也相同。Subtype 在这里表示 RTS 数据包。Receive ID 表示节点  $B$  的 ID, Transmitter ID 表示用户  $A$  的 ID。Duration 表示后续数据包需要的时间。

Type	Subtype	Duration	Receiver ID	Transmitter ID	Location	Time	Speed	Direction
------	---------	----------	-------------	----------------	----------	------	-------	-----------

图 9 RTS 结构

Fig. 9 Structure of RTS

此时,节点  $A$  为发射状态,节点  $B$  为接收状态,双方就可以实现本次邻居发现。节点  $B$  最多进行  $N$  次波束切换就可以收到用户  $A$  的 RTS 数据包。在用户  $B$  接收到数据包后,可以获得用户  $A$  的位置速度方向时间信息。用户  $B$  采用式(7)计算用户  $A$  的位置,波束交汇用户  $A$  并发射允许发送(clear to send, CTS)数据包给用户  $A$ 。CTS 数据包结构如图 10 所示。

Type	Subtype	Duration	Receiver ID	Location	Time	Speed	Direction
------	---------	----------	-------------	----------	------	-------	-----------

图 10 CTS 结构

Fig. 10 Structure of CTS

完成 RTS/CTS 邻居发现后,用户  $A$  进行数据传输。

基于预测的邻居发现协议的 RTS 和 CTS 结构比 BARTS 和 BACTS 结构长,增大了对信道的占用时间,但是预测算法减少了波束交汇时间,对信道的占用时间减少。基于位置预测算法的邻居发现协议与基于盲交汇算法的邻居发现协议的信道占用时间之比如式(8)所示,式中: $T_{RTS}$ ,  $T_{CTS}$ ,  $T_{BARTS}$ ,  $T_{BACTS}$  分别表示 RTS, CTS, BARTS, BACTS 时间; $T_{P-BA}$  表示基于预测算法邻居发现协议的平均邻居发现时间,如式(9)所示,其中  $i$  表示搜索次数。

$$\begin{aligned} R_{\text{channel}} &= \frac{(T_{RTS} + T_{CTS})T_{P-BA}}{(T_{BARTS} + T_{BACTS})T_{\text{Sy-Bave}}} \\ &= \frac{(T_{RTS} + T_{CTS})(1 + N)}{(T_{BARTS} + T_{BACTS})(1 + N^2)} \end{aligned} \quad (8)$$

$$T_{P-BA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N i = \frac{N+1}{2} \quad (9)$$

## 2.4 旁瓣效应下的邻居发现协议性能评估

前面所提出的盲交汇算法是基于理想的定向天线模型提出的。为了研究所提出的算法在更一般的场景中的适应性,对旁瓣效应下的邻居发现协议进行性能评估。

假设每个旁瓣的增益相同,主瓣和旁瓣的增益比为  $M$ 。主瓣的增益为  $G(\theta)$ ,因此天线增益模型<sup>[18]</sup>如式(10)所示, $\varphi$  表示通信指向方向, $\theta_{\text{main}}$  表示主瓣方向。

$$g(\varphi) = \begin{cases} G(\theta) & \varphi \in \theta_{\text{main}} \\ \frac{G(\theta)}{M} & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

理想的单波束定向天线和考虑旁瓣的单波束定向天线的区别在于:在旁瓣可以覆盖的通信距离范围内,旁瓣可以发送和接收控制信息。因此可以提高邻居发现的效率,同时也会增大碰撞的可能。在这里不考虑碰撞,仅分析旁瓣增加邻居发现的效率。

旁瓣对于邻居发现的影响:

- 1) 主瓣 - 旁瓣通信实现邻居发现;
- 2) 旁瓣 - 旁瓣通信实现邻居发现。

在情况 1 的条件下,主瓣 - 主瓣同样也可以实现邻居发现,在情况 2 的条件下,主瓣 - 主瓣、主瓣 - 旁瓣也可以实现邻居发现。

### 2.4.1 主瓣 - 旁瓣通信实现邻居发现

当两个节点的主瓣 - 旁瓣之间的通信距离可以满足两个节点的通信距离需求时,可以提高邻居发现的速度。

在同步状态下,最大盲交汇时间为  $NT$ ,因此其平均盲交汇时间如式(11)所示, $i$  表示搜索次数。

$$\begin{aligned} T_{\text{Sy-Bave}_{m-s}} &= \frac{1}{N^2} [2N - 1 + (N - 1) \sum_{i \in [2, N] \cup Z} i] \\ &= \frac{1 + N^2}{2N} T \end{aligned} \quad (11)$$

在异步状态下,最大盲交汇时间为  $(N + 1)T$ ,因此平均盲交汇时间为:

$$\begin{aligned} T_{\text{ANSy-Bave}_{m-s}} &= \frac{1}{N^2} [2(2N - 1) + (N - 1) \sum_{i \in [3, N+1] \cup Z} i] \\ &= \frac{1 + 2N + N^2}{2N} T \end{aligned} \quad (12)$$

### 2.4.2 旁瓣-旁瓣通信实现邻居发现

当两个节点的旁瓣-旁瓣之间的通信距离可以满足两个节点的通信距离需求时,可以提高邻居发现的速度。

旁瓣-旁瓣邻居情况下,邻居发现可以看作是全向天线的邻居发现,其同步异步状态均相同。因此其最长的盲交汇时间为  $T$ 。

## 3 仿真分析

### 3.1 盲交汇算法计算复杂度性能对比

本节对本文所提盲交汇算法和文献[17]提出的 ODND 波束盲交汇算法的复杂度进行对比。这里将一个取余运算作为算法复杂度计算的单位。

在文献[17]提出的 ODND 算法中,每个时隙要进行一次取余运算来计算其天线的指向方向,因此在最坏的情况下,其要进行  $L_{\max}\{p_a q_b, p_b q_a\}$  次取余运算。本文提出的盲交汇算法不需要进行取余运算,只要按照设计的序列顺序进行下次的天线选择即可。位置预测算法会增加算法运行时间,因此通过仿真分析盲交汇算法、位置预测算法和 ODND 算法计算复杂度。

采用 MATLAB 对三个算法进行算法复杂度仿真,设置仿真次数为 10 000,统计算法的累计运行时间,结果如图 11 所示。

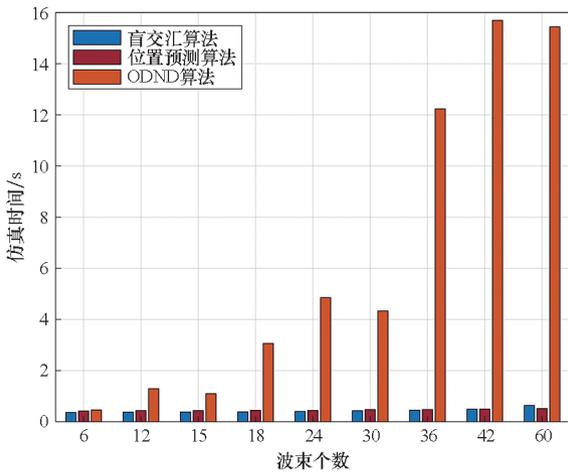


图 11 不同算法复杂度对比

Fig. 11 Complexity comparison of different algorithms

图 11 可以看出,本文提出的盲交汇算法仿真时间远小于 ODND 算法,盲交汇算法的时间随波束个数增长而增长,并且不同的波束个数对应得到的仿真时间均小于 ODND 算法。ODND 算法序列生成方式见文献[17]的式(2),根据该序列的生成方式可知:波束个数  $N$  接近满足式(13)的  $2^n$

时,ODND 协议的随机性大大降低,算法执行较少的选择语句,造成 ODND 算法的时间没有随着波束个数的增加而增加。波束个数为 12 的仿真时间大于波束个数为 15 的,波束个数为 24 的仿真时间大于波束个数为 30 的。但是其仿真时间均大于本文提出的算法。此外,位置预测算法增加位置预测会加大算法计算时间,因此在波束个数小于 42 时,位置预测算法的计算时间大于盲交汇算法。位置预测算法的解空间大小是  $N$ ,而盲交汇算法和 ODND 算法的解空间是  $N^2$ ,随着  $N$  增大,解空间指数倍增大导致其计算时间增加速度远大于位置预测算法,在波束个数大于 42 时,其计算时间大于位置预测算法。

$$2^{n-1} < N \leq 2^n \quad n > 1, n \in \mathbf{Z} \quad (13)$$

### 3.2 基于盲交汇算法的邻居发现协议最长邻居发现时间和平均邻居发现时间性能对比

为了验证盲交汇算法的邻居发现性能,对盲交汇算法邻居发现的最长发现时间和平均发现时间进行了仿真,并和文献[17]的 ODND 算法进行了对比。设置仿真次数为 10 000,统计 10 000 次邻居发现的最长发现时间和 10 000 次邻居发现的平均发现时间。

不同算法的邻居发现协议最长邻居发现时间(时隙个数)如图 12 所示。从图 12 中可以看出,在不同波束个数条件下,基于盲交汇算法的邻居发现协议最长邻居发现时间均小于 ODND 协议的最长邻居发现时间。

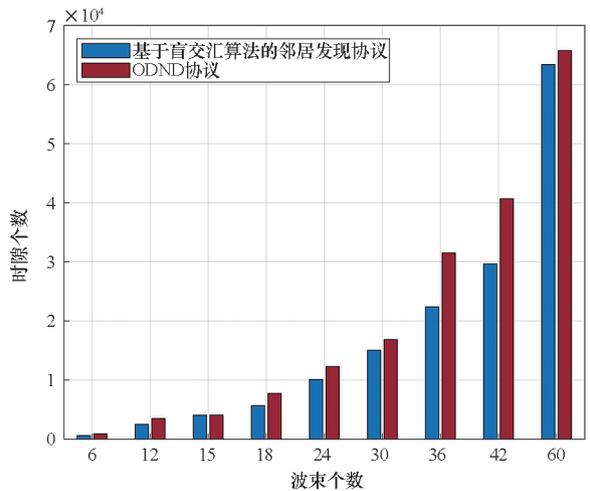


图 12 不同算法最长邻居发现时间对比

Fig. 12 Worst-case neighbor discovery delay comparison of different algorithms

不同算法的平均邻居发现时间(时隙个数)如图 13 所示。在波束个数为 15、24、30、60 时,基于盲交汇算法的邻居发现协议的平均发现时间小

于 ODN D 协议,其他情况下,基于盲交汇算法的邻居发现协议的平均发现时间大于 ODN D 协议。由于波束个数  $N$  接近满足式(13)的  $2^n$  时,ODN D 协议的随机性大大降低,其平均发现时间高于本文所提算法的。当节点波束个数  $N$  和满足式(13)的  $2^n$  之差越大时,其随机发现的次数增加,从而降低了平均发现时间。若 ODN D 算法的  $N$  仅满足  $2^n \geq N$ ,可以通过增大  $2^n$  减少平均邻居发现时间,但这会严重增加最长邻居发现时间。

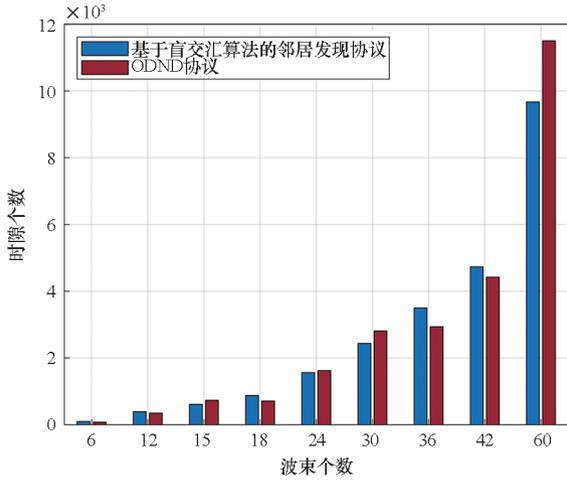


图 13 不同算法平均邻居发现时间对比

Fig. 13 Average neighbor discovery delay comparison of different algorithms

从图 13 中可以看出,在波束个数  $N$  接近满足式(13)的  $2^n$  时,基于盲交汇算法的邻居发现协议的平均发现时间小于 ODN D 协议。例如: $N$  为 12 时基于盲交汇算法的邻居发现协议的平均发现时间大于 ODN D 协议,当  $N$  为 15 时基于盲交汇算法的邻居发现协议的平均发现时间小于 ODN D 协议。 $N$  为 12 和  $N$  为 15 时,符合式(13)的  $2^n$  为 16,因此当  $N$  接近 16 时,基于盲交汇算法的邻居发现协议的平均发现时间小于 ODN D 协议。

为了对上述分析的结论进行更详细的说明,对基于盲交汇算法的邻居发现协议和 ODN D 协议的平均发现时间进行对比。考虑波束个数为 8~16 和波束个数为 16~32 情况下,基于盲交汇算法的邻居发现协议和 ODN D 协议得到的平均发现时间如图 14 和图 15 所示。

从图 14 得知,在波束个数为 8 时基于盲交汇算法的邻居发现协议平均发现时间小于 ODN D 协议,在波束个数为 9 时基于盲交汇算法的邻居发现协议平均发现时间大于 ODN D 协议。这是因为在  $N$  为 8 时满足式(13)的  $2^n$  为 8, $N$  和  $2^n$  之

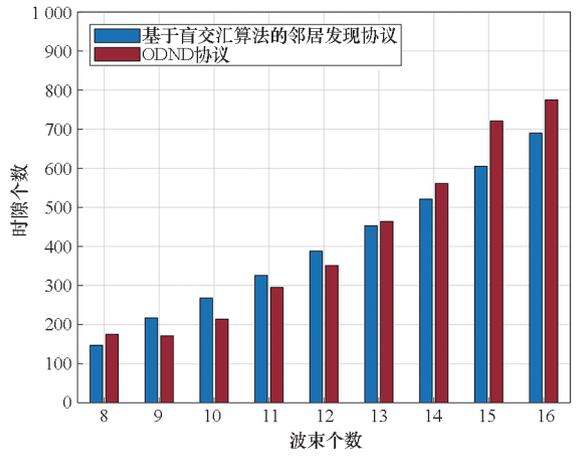


图 14 波束个数为 8 到 16 时的平均发现时间对比

Fig. 14 Average discovery delay comparison under different number of sectors ranging from 8 to 16

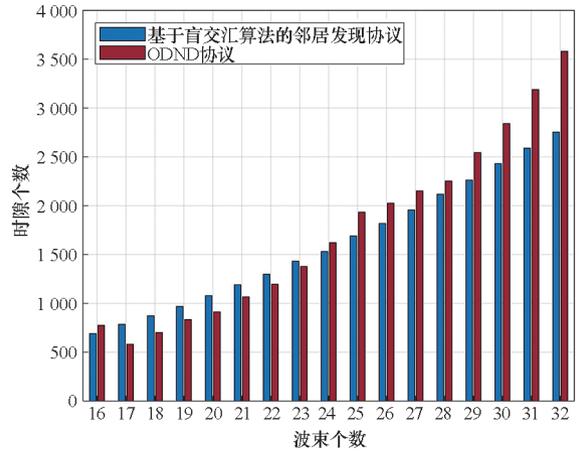


图 15 波束个数为 16 到 32 时的平均发现时间对比

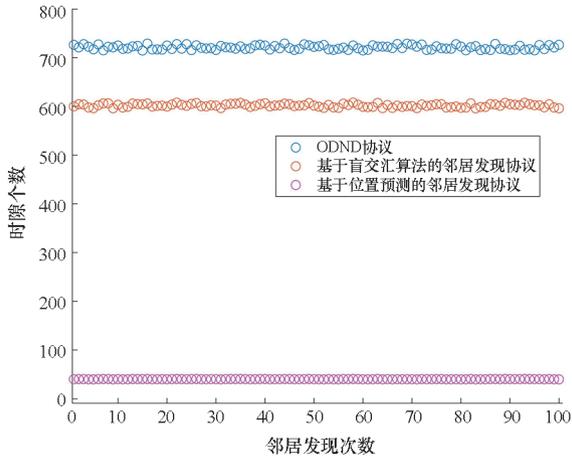
Fig. 15 Average discovery delay comparison under different number of sectors ranging from 16 to 32

差为 0,由于 ODN D 算法的随机性下降,基于盲交汇算法的邻居发现协议平均发现时间小于 ODN D 算法。 $N$  为 9 时满足式(13)的  $2^n$  为 16, $N$  和  $2^n$  之差为 7,基于盲交汇算法的邻居发现协议平均发现时间大于 ODN D 算法。当波束个数大于等于 13 时满足式(13)的  $2^n$  为 16, $N$  接近  $2^n$  (16),基于盲交汇算法的邻居发现协议平均发现时间小于 ODN D 协议。图 15 中可以得到相同的结论,在波束个数大于等于 24 时, $N$  接近  $2^n$  (32),基于盲交汇算法的邻居发现协议平均发现时间小于 ODN D 协议。

### 3.3 基于位置预测的邻居发现算法性能

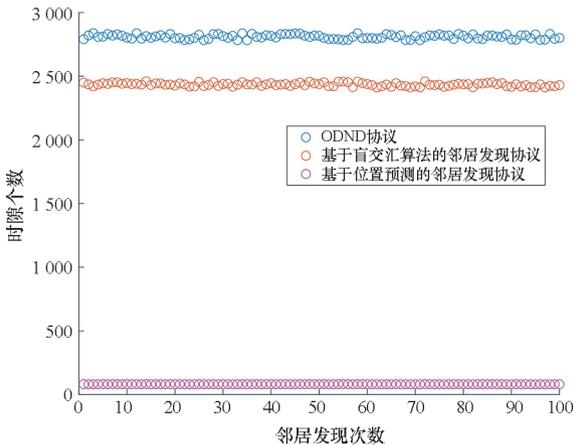
为了分析位置预测对邻居发现算法性能的影响,对比了采用位置预测和不采用位置预测情况下的邻居发现时间。令每对节点邻居发现 100 次,每次邻居发现后两个节点按照匀速直线

运动,然后重新进行邻居发现。设置仿真实验次数为 10 000,并取 10 000 次实验的平均值作为邻居发现的时间,结果如图 16 所示。



(a) 波束个数为 15

(a) Number of sectors is 15



(b) 波束个数为 30

(b) Number of sectors is 30

图 16 100 次邻居发现每次所需时间

Fig. 16 Discovery delay of continuous 100 times neighbor discovery

在图 16 中,通过对比不同波束下的邻居发现时间可以得知,基于位置预测后邻居发现的平均时间明显减小。在基于盲交汇算法的邻居发现协议首次邻居发现后,获得时间同步、位置、速度等信息,基于位置预测的邻居发现协议利用这些信息进行位置预测可以迅速降低邻居发现的时间。

## 4 结论

本文提出了一种基于盲交汇算法的毫米波网络邻居发现协议。通过推导邻居发现过程中扫描间隔、波束个数与邻居发现时间之间的理论关系,提出了一种定向波束盲交汇算法。在没有任何交汇信息的情况下,两个节点通过基于盲交汇算法

的邻居发现协议实现邻居发现。基于盲交汇算法的邻居发现协议只需按照波束盲交汇算法顺序扫描实现波束交汇,每个波束扫描时隙执行邻居发现协议便可以实现邻居发现。仿真验证得知基于盲交汇算法的邻居发现协议最长邻居发现时间小于 ODND 协议。各个节点通过基于盲交汇算法的邻居发现协议获得邻居位置、时间同步信息等信息后采用位置预测算法快速实现邻居发现。仿真验证结果表明,采用位置预测的算法后,邻居发现时间迅速减少。

## 参考文献 (References)

- [1] GUAN K, PENG B L, HE D P, et al. Channel sounding and ray tracing for intrawagon scenario at mmWave and sub-mmWave bands [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(2): 1007 - 1019.
- [2] AL-SHAMMARI B K J, HBURI I, IDAN H R, et al. An overview of mmWave communications for 5G [C]// *Proceedings of 2021 International Conference on Communication & Information Technology*, 2021: 133 - 139.
- [3] NAQVI S M R, HO P H, PENG L M. 5G NR mmWave indoor coverage with massive antenna system [J]. *Journal of Communications and Networks*, 2021, 23(1): 1 - 11.
- [4] SUN S, RAPPAPORT T S, THOMAS T A, et al. Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5G wireless communications [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(5): 2843 - 2860.
- [5] YANG B, TALEB T, SHEN Y L, et al. Performance, fairness, and tradeoff in UAV swarm underlaid mmWave cellular networks with directional antennas [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(4): 2383 - 2397.
- [6] KHAN Z, LEHTOMÄKI J J, SELIS V, et al. Intelligent autonomous user discovery and link maintenance for mmWave and TeraHertz devices with directional antennas [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(4): 1200 - 1215.
- [7] CHEN L, BIAN K G. Neighbor discovery in mobile sensing applications: a comprehensive survey [J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 48: 38 - 52.
- [8] DANG D N M, NGUYEN V, LE H T, et al. An efficient multi-channel MAC protocol for wireless Ad Hoc networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 44: 46 - 57.
- [9] DUAN R, LI Y A, LYU N, et al. A new MAC protocol for intra-flight data link based on directional antenna [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1570(1): 012058.
- [10] AN X L, PRASAD R V, NIEMEGERERS I. Impact of antenna pattern and link model on directional neighbor discovery in 60 GHz networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(5): 1435 - 1447.
- [11] CAI H, WOLF T. On 2-way neighbor discovery in wireless networks with directional antennas [C]// *Proceedings of 2015 IEEE Conference on Computer Communications*, 2015: 702 - 710.
- [12] CAI H, LIU B, GUI L, et al. Neighbor discovery algorithms in wireless networks using directional antennas [C]//

- Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications, 2012: 767 – 772.
- [13] ALDALBAHI A, SHAHABI F, JASIM M. BRNN-LSTM for initial access in millimeter wave communications [J]. *Electronics*, 2021, 10(13): 1505.
- [14] ZHANG J L, XU W J, GAO H, et al. Codebook-based beam tracking for conformal array-enabled UAV mmWave networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(1): 244 – 261.
- [15] JHA N, CHAUDHURI S, BAPAT J, et al. An efficient beam search algorithm for mmWave massive MIMO [C]// Proceedings of 2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, 2021: 1 – 6.
- [16] CHEN L, LI Y, VASILAKOS A V. On oblivious neighbor discovery in distributed wireless networks with directional antennas; theoretical foundation and algorithm design [J]. *ACM Transactions on Networking*, 2017, 25(4): 1982 – 1993.
- [17] CHEN L, LI Y, VASILAKOS A V. Oblivious neighbor discovery for wireless devices with directional antennas[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM 2016; the 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, 2016: 1 – 9.
- [18] WANG Y, ZHANG T C, MAO S W, et al. Directional neighbor discovery in mmWave wireless networks[J]. *Digital Communications and Networks*, 2021, 7(1): 1 – 15.
- [19] PARK H, KIM Y, SONG T, et al. Multiband directional neighbor discovery in self-organized mmWave ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(3): 1143 – 1155.
- [20] FELEMBAN E, MURAWSKI R, EKICI E, et al. SAND: sectored-antenna neighbor discovery protocol for wireless networks [C]//Proceedings of 2010 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2010: 1 – 9.
- [21] VASUDEVAN S, KUROSE J, TOWSLEY D. On neighbor discovery in wireless networks with directional antennas[C]// Proceedings of IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2005: 2502 – 2512.
- [22] LIU B, RONG B, HU R Q Y, et al. Neighbor discovery algorithms in directional antenna based synchronous and asynchronous wireless ad hoc networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2013, 20(6): 106 – 112.
- [23] 李佳迅. 无人系统多信道动态接入与组网的理论与应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- LI J X. Research of theory and application on multi-channel dynamic access and networking in unmanned system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [24] 史富荣, 沈大立, 谭焯州. 相控阵天线波束跃度仿真分析及算法优化[J]. *电子信息对抗技术*, 2019, 34(5): 67 – 71.
- SHI F R, SHEN D L, TAN C Z. Simulation analysis and algorithm optimization of beam granularity phased array antenna [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2019, 34(5): 67 – 71. (in Chinese)
- [25] LI J X, ZHAO H T, WEI J B, et al. Sender-jump receiver-wait: a simple blind rendezvous algorithm for distributed cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 17(1): 183 – 196.
- [26] BIAN K G, PARK J J. Maximizing rendezvous diversity in rendezvous protocols for decentralized cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(7): 1294 – 1307.

(编辑: 梁慧, 杨琴)