引文格式：舒海翅,戚克培,邹璇,等. 自组网通信模块对北斗信号接收性能的影响分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(11): 119-122. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.11.029

自组网通信模块对北斗信号接收性能的影响分析

舒海翅[1]，戚克培[2]，邹　璇[2]，李洋洋[2]，杨　佳[3]
（1. 长江空间信息技术工程有限公司（武汉），湖北 武汉 430010；2. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心，湖北 武汉 430072；
3. 武汉攀达时空科技有限公司，湖北 武汉 430079）

摘　要：无人机载体体积小、载重轻，设备安装的空间有限，采用的螺旋天线抗干扰能力较差，且集群所需的自组网通信模块天线和北斗天线距离较近，若安装不当易干扰北斗信号。首先介绍了无人机集群北斗高精度相对定位和自组网通信，并在理论上根据自组网通信模块的信号发送方式分析了其对北斗信号的干扰原因；然后测试了多种安装方式对北斗信号质量的影响，并统计了可用卫星数、信噪比等指标；最后根据理论分析和实际测试结果，提出自组网通信模块天线最佳安装方式。结果表明，自组网通信模块安装方式对信号（特别是北斗GEO卫星）的影响较大。

关键词：无人机集群；自组网；通信；干扰；北斗定位
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）11-0119-04

Influence Analysis of the Ad-Hoc Network Communication Module on Beidou Signal Reception Performance

SHU Haichi[1], QI Kepei[2], ZOU Xuan[2], LI Yangyang[2], YANG Jia[3]
(1. Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
2. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Wuhan Panda Space & Time Technology Co., Ltd., Wuhan 430079, China)

Abstract: Since the UAV carrier is small in size, light in load and limited space for equipment installation, the Beidou antenna used on it usually adopts a helical antenna with poor anti-interference ability. At the same time, the distance between the antenna of Ad-Hoc network communication module required by the cluster and the Beidou antenna is relatively close. If the installation method is improper, it is easy to cause interference to the Beidou signal. Therefore, we introduced the high-precision relative positioning of UAV cluster based on Beidou and the Ad-Hoc network communication, and theoretically analyzed the reason for the interference of Ad-Hoc network communication module to the Beidou signal according to the signal transmission mode of Ad-Hoc network communication module at first. Then, we carried out practical test on the influence of Beidou signal quality in various installation scenarios, and statistically analyzed the indicators such as the number of available satellites and the signal-to-noise ratio. Finally, according to the theoretical analysis and actual test results, we put forward the antenna optimal installation method of Ad-Hoc network communication module in the UAV cluster. The experimental results show that the installation method of Ad-Hoc network communication module has a significant influence on the signal, especially the signal of Beidou GEO satellite.

Key words: UAV cluster, Ad-Hoc network, communication, interference, Beidou positioning

基于北斗/GNSS的无人机集群动动定位作为当前定位领域的一个热点方向，具有广阔的应用前景。海军舰队和无人机编队、飞行器对接以及智能驾驶、自动驾驶等领域均需获取无人机精确的相对位置[1]。为解算无人机终端间的相对位置关系，且各无人系统之间需具备信息快速交互的能力，因此无人系统间需构成一个可靠的自组网络[2-3]。由于北斗/GNSS定位需要接收卫星信号，因此终端必须配备合适的天线来确保信号质量，以保证定位精度[4]。不同的北斗/GNSS卫星对定位精度的影响不同。根据运行轨道的不同，北斗卫星可分为地球同步轨道（GEO）卫星、中地球轨道（MEO）卫星和倾斜地球同步轨道（IGSO）卫星。虽然GEO卫星轨道误差较大，但能显著改善IGSO卫星的位置精度因子，因此GEO+MEO+IGSO卫星星座能保证最好的定位精度[5]。在无人机集群精密相对定位过程中，需要解算多个终端间的相对位置关系，因此无人机定位终端不仅需装载接收卫星信号的卫星天线，还需配备集群内数据交互的通信天线。为保证定

收稿日期：2023-06-05。
第一作者简介：舒海翅（1978—），高级工程师，研究方向为水利工程安全监测、GNSS数据处理，E-mail：40663984@qq.com。

位结果的实时性，各终端间将通过通信天线进行高时频高强度的数据传输[6-7]，其无线电信号发射功率一般较大，若不对其进行处理将产生严重的电磁干扰[8-9]，使接收的卫星信号质量严重下降，并影响到最终的相对定位精度。本文将从卫星信号和通信信号的强度、频率、带宽、信噪比、极化方式等特性出发，探究了二者互相影响的机制，并提出了在无人机集群相对定位中避免二者相互干扰的方案。

1 无人机集群高精度相对定位

随着北斗系统定位技术与各行业的深入结合，目标多、间隔小、速度快、要求精确可信的位置服务应用更为广泛，传统的RTK技术已不能完全满足应用需求，由此衍生出了流动站与基准站均移动的动态相对定位技术[10]。该技术是动态目标与动态目标之间的相对定位，可精确确定目标之间的相对位置和相对姿态信息[4]，并根据距离的远近自动调整解算策略。

在无人机集群的相对运动过程中，如何获取目标间精确、可信的实时相对位置是确保整个编队正常作业的前提。为提高作业的安全性和效率，无人机编队中各终端需针对周围其他动态目标的不同精度位置感知需求，以自身位置为中心，与其他目标之间通过无线通信网络进行链接，实时解算相对位置关系，从而自主构建与其他目标之间精确的位置关系网[11]。无人机集群的高效分布式无线自组网通信技术是各无人机间进行协同高精度相对定位作业的基础和前提。由于协同高精度相对定位需要各终端间具备信息快速交互的能力，因此自组网内存在高密度高时频的数据传输（图1）；同时动态相对定位技术也需依赖卫星信号的接收，二者可能会产生相互干扰[8]。

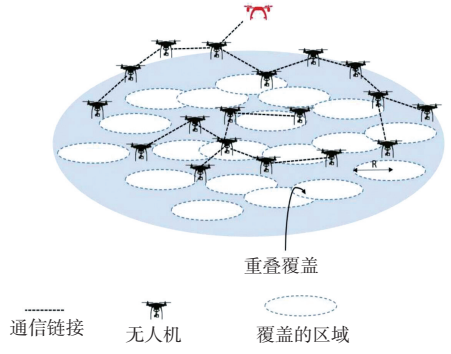


图1 无人机自组通信网络

2 自组网通信模块及其对北斗信号的干扰

2.1 自组网通信模块

为解算无人机集群的实时相对位置，需要各无人机终端构建一个自组网络。由于无人机集群具有规模大、移动速度快、数据通信复杂的特点，因此采用可配置的远距和近距混合无线通信技术。无人机集群规模越大，相对定位所需解算的基线数目越多，单位时间内自组网通信量就越大；且由于无人机飞行速度快、作业范围广，对于自组网数据传输距离和延迟也有较高要求。针对无人机集群高精度相对定位的特点，选用西安思后的WR系列Ipmeshnet远距离无线通信模块，发射功率为33 dBm(2W)，收发采用频分双工方式，工作频段选择1 415 MHz频段，带宽为10 MHz。中心频率为1 415 MHz的通信模块的特点为：①通信范围大，最大数据通信距离可达10 km；②带宽高，各通信节点间最大传输速率超过1 Mbps；③延迟低，平均延迟可控制在0.1 s内；④质量轻，各自组网通信终端重量小于300 g。针对自组网中通信模块多属性可配置的特性，设计多通道异构拓扑结构和层次型组网机制。网络化多通道通信模块包括WiFi和SC-FDE/OFDM两个通信单元，前者适用于近距离范围（200 m）联动目标集群的高速低延迟通信；后者适用于远距离范围（10 km）联动目标集群的高可靠通信。无线通信单元由单片射频收发前端电路和FPGA数字基带处理器组成，前者采用Lime Microsystems公司的LMS6002D芯片，实现零中频到射频的双向变换；后者采用Altera公司的MAX10系列FPGA芯片，实现2DPSK的基带调制与解调以及接收同步功能。与无线通信单元的接口采用高速EMIF接口，实现TMS320DM6446内的DSP内核与无线通信单元的FPGA高速交换信号，可为通信信号处理提供可能。

2.2 北斗卫星信号特性

目前北斗系统提供的主要信号特性见表1。北斗信号调制方式包括二进制相移进控调制（BPSK）和正交相移键控调制（QPSK），B1C还包含二进制偏移载波调制（BOC）。发射信号极化方式基本为右旋圆极化（RHCP）[12-13]。BPSK调制下的卫星导航信号数学模型为：

$$s^{(i)}(n)=\sqrt{2P_s}(x^{(i)}(n)D^{(i)}(n))\sin\left(2\pi f_c\left(\frac{n}{f_s}\right)+\theta\right) \quad (1)$$

式中，$n=1,2,\cdots,N$；$x^{(i)}(n)$为第i颗卫星的测距码；$D^{(i)}(n)$为第i颗卫星的数据码电平值；f_c为载波频率；θ为载波初始相位；f_s为信号采样频率[9]。

2.3 信号干扰分析

为探究自组网信号对北斗卫星信号的干扰机制，本文对典型的干扰信号进行分析。由于现代技术手段的飞速发展，空间电磁环境日趋复杂，北斗信号在传

表1　北斗卫星信号特性

信号	标称频率/MHz	适用卫星	带宽/MHz	调制方式	卫星发射信号极化方式
B1I	1 561.098	BDS+BDS：MEO、IGSO、GEO	4.092	BPSK	RHCP
B1C	1 575.42	BDS3：MEO、IGSO	32.736	BOC(1,1)、QMBOC(6,1,4,33)	RHCP
B2I	1 207.14	BDS2	20.46	QPSK	RHCP
B2a	1 176.45	BDS：MEO、IGSO	20.46	BPSK	RHCP
B2b	1 207.14	BDS：MEO、IGSO	20.46	BPSK	RHCP
B3I	1 268.52	BDS+BDS：MEO、IGSO、GEO	20.46	BPSK	RHCP

播路径中将遇到诸多考验，将对导航系统的PVT精度产生很大影响。影响导航系统的干扰信号可分为欺骗干扰和压制干扰。根据干扰和导航信号频谱宽度的相对大小，可将干扰分为单音干扰、窄带干扰和宽带干扰，窄带干扰是指干扰信号所占带宽小于目标带宽10%的干扰，否则为宽带干扰[9]。由于自组网通信模块的发射功率较大、带宽较宽，可认为是压制干扰、宽带干扰[14]。

本文通过信噪比来衡量二者的干扰特性，计算公式为：

$$R_{SN}=10\lg\frac{P_s}{P_n} \tag{2}$$

式中，P_s为卫星信号的平均功率；P_n为噪声信号的平均功率。

3　干扰测试

2021年3月23日在武汉市进行测试和对比分析。测试设备采用武汉大学自研的联动目标高精度相对定位终端，通信模块采用西安思后的WR系列Mesh自组网电台，北斗板块采用上海司南803板块。在通电5 min后北斗信号稳定时，分别记录北斗卫星的信噪比和可用卫星数，以衡量北斗信号的质量。本文分别测试不同通信天线安装方式、天线间距离对北斗卫星信号接收的影响，测试方案见表2。为探究信号干扰的干扰源是否是通信天线，在不同的安装方案下选择性地添加屏蔽铝板。GEO、IGSO和MEO卫星的信噪比和可用卫星数见表3，可以看出，通信天线安装方式和天线间距离均会对接收的北斗卫星信号质量产生影响，无论通信天线竖直向上或倾斜30°向上都会导致GEO卫星信噪比为0（方案2、3）；距离为0.2 m时，即使加装屏蔽铝板，GEO卫星的信噪比仍为0，无法阻止通信信号对卫星信号接收的干扰（方案10、11）；同样的安装方式，若二者距离在0.1 m以内（方案6、7），则GEO卫星的3个频点信噪比能保持在40 dBHz以上，说明近距离加装屏蔽铝板能抑制天线间的信号干扰；通信天线朝下时，不会发生信号间的干扰（方案1、4）；当两种天线朝向相同，即通信天线朝上时，可用卫星数由13降至9，即GEO卫星均表现为不可用，说明在通信天线与北斗天线方向朝向相同，且距离为0.2 m时，会使GEO卫星信号受到干扰，信噪比降至0，无可用卫星；当两种天线朝向相反时，北斗3频信号保持正常。若发生干扰，GEO卫星信噪比即表现为0，否则可保持在40 dBHz，因此可排除添加铝板前后造成的多路径效应对实验的影响。

表2　安装方案

方案编号	安装方式	是否加装铝板	天线间距离/m	
			水平	高程
1	竖直向下	否	0.2	0.2
2	两侧向上30°向	否	0.2	0.1
3	一侧向下，一侧向上30°向	否	0.2	0.1
4	竖直向下	是	0.2	0.2
5	两侧水平	是	0.25	0.2
6	两侧向上30°向	是	0.1	0.04
7	两侧向上30°向	是	0.05	0.3
8	竖直向上，与北斗天线平行	是	0.2	0
9	竖直向上，放在北斗天线下	是	0	0
10	竖直向上	是	0.2	0.1
11	一侧向下，一侧向上30°向	是	0.2	0.1

表3　不同方案下GEO、IGSO和MEO卫星的信噪比和可用卫星数

方案	GEO卫星各频点信噪比/dBHz			IGSO/MEO卫星各频点信噪比/dBHz			可用卫星数
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	
1	43.0	44.7	38.0	44.1	44.5	40.6	13
2	0	0	0	42.8	44.2	42.7	9
3	0	0	0	43.4	45.1	40.0	10
4	40.0	45.3	38.7	42.2	43.8	41.9	13
5	41.0	45.3	39.0	42.4	44.0	41.2	13
6	41.3	46.0	40.3	42.8	40.5	40.6	13
7	39.8	45.5	40.3	42.9	44.2	42.0	13
8	40.0	42.0	41.0	44.8	46.0	44.0	9
9	39.3	42.7	40.0	43.3	41.6	41.5	12
10	0	0	0	40.8	43.2	41.6	9
11	0	0	0	41.3	43.8	41.4	9

注：信噪比为0，表示无信号。

将安装距离控制在0.2 m，本文对不同通信天线安装方案影响下的北斗3频信号整体表现进行探究，信噪

比图形见图2，可以看出，3个频点中B2频段受影响最小，通信天线竖直向下和两侧水平安装对接收的北斗3频信号质量影响较小，整体信噪比在40 dBHz以上，可满足北斗定位需求；而当通信天线与北斗天线朝向相同，即向上安装时，北斗3频信号的信噪比整体下降，特别是两根通信天线分向上下的情况，整体信噪比降至20 dBHz左右，北斗信号的质量出现严重下滑。

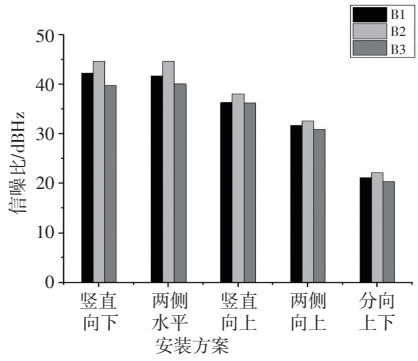
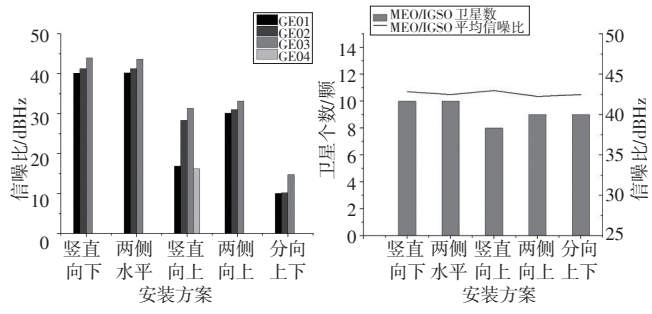


图2 不同安装方案下各北斗频点接收信号信噪比

不同通信天线安装方案影响下北斗不同星座受干扰情况见图3，可以看出，无人机自组网通信信号对GEO卫星和MEO/IGSO卫星信号的影响差异明显，GEO卫星受其影响较大，错误的安装方式会导致GEO卫星信号接收困难，竖直向下和两侧水平两种方案获得的信噪比接近，可保持在40 dBHz以上，通信天线向上时，整体信噪比会发生陡降，且会出现GEO卫星信号失锁使可用卫星数下降的情况；MEO/IGSO卫星受其影响不大，竖直向下安装时信噪比最差，约为37 dBHz，信噪比最好的安装方式仍为竖直向下和两侧水平，平均可用卫星数整体稳定在10~11颗。其原因在于，GEO卫星的运行轨道较高、信号覆盖范围很广，具有良好的抗遮蔽性；但距离地面远，在卫星发射功率相同的情况下，在地球表面接收到的GEO卫星信号就更加微弱，如B1I的最低信号功率为–163 dBw，更易受到电磁干扰，特别是自组网通信信号的发射功率可达33 dBw，对GEO卫星信号的影响更大。



a GEO卫星 b MEO/IGSO卫星

图3 不同安装方案下各GEO、MEO/IGSO卫星信号图

综上所述，通信天线竖直向下和两侧水平安装接收的卫星信号质量较好，受干扰影响较小，但在实际自组网中，两侧水平安装会导致自组网通信信号较差，应采用竖直向下安装方式以避免两种信号的相互干扰。因此，将通信天线竖直向下安装，北斗天线与通信天线水平、竖直均间隔0.2 m以上，即可较好避免二者之间的干扰。

4 结 语

本文分析联动目标自组网北斗定位中北斗定位信号和自组网通信信号的特性发现，二者在工作中存在一定的干扰，易影响接收的北斗定位信号质量，若天线之间安装方式不当将导致接收机搜索不到GEO卫星。通过分析比较不同安装方式、安装距离发现，在北斗天线竖直向上安装的前提下，将通信天线竖直向下安装、水平和竖直间隔控制在0.2 m以上时，可以很好地避免二者之间的干扰，北斗信号信噪比能控制到40 dBHz左右，可确保整体北斗自组网定位解算的顺利进行。

参考文献

[1] Ryan A,Zennaro M,Howell A,et al. An Overview of Emerging Results in Cooperative UAV Control[C]. 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2004(1): 602-607

[2] Bai G, Li Y, Fang Y, et al. Network Approach for Resilience Evaluation of a UAV Swarm by Considering Communication Limits[J]. Reliability Engineering and System Safety,2020,193:106 602

[3] Yin D, Xiang X, Li J, et al. Research on Ad-hoc Network for UAV Swarm Based on OPNET Simulation[C]. 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT),2020

[4] Luo N, Lachapelle G R. Relative Positioning of Multiple Moving Platforms Using GPS[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2003,39(3):936-948

[5] 苏艳华,韩飞,吴浩. 北斗GEO/IGSO/MEO混合星座对控制测量的影响分析[J]. 测绘科学,2020,45(12):40-44

[6] 陈思静,张可,贺颖. 高动态自组织无人机网络架构设计与模式研究[J]. 计算机科学,2015,42(2):50-54

[7] 廖方圆,周华吉,李京华,等. 无人机群通信网络态势感知研究现状与发展趋势[J]. 航空兵器,2019,26(4):16-22

[8] 江俊敏. 基于SIMULINK的CDMA信号对无人机系统的干扰仿真分析[D]. 北京:北京邮电大学,2007

[9] 梁欣萌. 北斗民用信号干扰检测与识别技术研究[D]. 天津:中国民航大学,2020

（下转第133页）