

# 惯性技术在航空领域的发展与应用

范秋丽

**摘 要** 概述了航空领域的特性和对惯性技术的独特需求,并同航天和航海领域进行了对比;简述了航空惯性导航技术的发展历程、现状及其在军用和民用飞机上的应用情况;基于美国近期开展的相关项目研究,总结了未来航空惯性导航技术的发展趋势,并针对我国目前航空惯性导航技术的境况,提出了我国在该领域发展的建议。

**关键词** 航空导航技术 惯性导航系统 环形激光陀螺 光纤陀螺

## 引 言

对于人类活动来说,远程自主导航是一项艰巨的任务。而惯性导航系统是不依赖于任何外部信息、也不向外部辐射能量、不易受到干扰的自主导航系统,在商用和军事领域得到了广泛应用,目前是军用和民用飞机必不可少的装备之一。

在现代战争中,惯性系统无论是保障作战飞机进行精确导航和定位,还是支撑精确制导武器实施防区外精确打击,都发挥了保障、支撑和全局性作用,惯性装置已成为现代高技术武器中不可替代的一种装备;对于民用飞机,以惯性器件为中心的导航系统是机上不可或缺的装置,是支持飞机安全飞行、引导和进近,顺利实施飞行任务的重要保证。惯性在军民两方都有极大的需求,世界各大大国历来重视发展惯性技术,惯性技术已成为国防现代化中的一项关键技术。

## 1 航空领域对惯性导航系统的需求

就航空领域而言,不同机种因任务特点不同,对惯性导航的需求就不同,如战斗机具有高速、高机动性、作战时间较短(一般为2~3 h)、对隐身性

要求高的特点,同时是空中战术导弹之类精确打击武器的平台,在对抗环境中主要采用惯性导航,因此战斗机对惯性技术的要求为高动态范围、导航级精度且要求校准时间短。像预警与侦察机需要在防区外具有长航时稳定工作能力(预警机一般为10 h左右,全球鹰无人侦察机可达40 h<sup>[1]</sup>),其也是机载侦察和探测有效载荷的平台基准,因此主机载体要求惯性技术为导航级精度,载荷平台可用战术级精度。民用运输机由于飞行环境较为平稳,对全球定位系统(GPS)和地面导航设备依赖性强,飞行航路较为固定,经济性和可靠性因素占比较重,因此惯性技术主要作为GPS的补充导航手段,多用于航向姿态测量,要求低寿命周期成本。

从整体来看,空、天、海(包括战术导弹)各领域对惯性导航系统的要求各不相同,航空用惯性导航系统在一次任务中的持续工作时间较短,一般在数小时之内,最长不过几十小时,但航空惯性导航的体积、质量和功耗(SWaP)有较多限制,而且受振动和机动性的影响也较大。表1为空、天、海以及战术导弹平台特性和导航要求的比较。

## 2 惯性技术在航空领域的发展历程

二战期间,无线电导航是当时飞机导航的主要手段。然而,地基信标战争时期容易被干扰和摧毁,和平时期存在衰减和大气问题。因此,对独立于地基信标的空中导航系统的需求催生了第一套机载惯性导航系统的出现。1950年,由美国奥特奈蒂斯公司研制的全惯性导航仪XN1在C-47飞机上进行了约1 h的飞行试验,飞行误差约为3.2 km<sup>[2]</sup>。

本文2017-08-18收到,范秋丽系中国航空工业发展研究中心研究员

飞航导弹 2017年第10期

• 1 •

表 1 空、天、海和战术导弹领域特点对比

应用领域	机动性	工作时间	SWaP 要求	应用规模	导航精度要求
卫星	★	★★★★( 数年)	★★★★	★	战略级
航空	★★★	★★( 2 ~ 40 h)	★★	★★★	导航级
舰船	★★	★★★( 数月)	★	★★	战略级
战术导弹	★★★★	★( 半小时之内)	★★★	★★★★	战术级

20 世纪 60 年代，第二代超声速喷气战斗机问世，并开始装备惯性导航系统。1961 年利顿公司平台式液浮陀螺惯性导航系统 LN 3 装备在美国第二代战斗机 F-104 上，成为首个战斗机用惯性导航系统。动力调谐陀螺也是 20 世纪 60 年代研制的，响应时间较快，在较宽的温度范围内具有较好的性能，比液浮陀螺仪便宜，国外 20 世纪 70 年代研制的第三代战斗机上均装备了动力调谐陀螺基平台惯性导航系统。1963 年霍尼韦尔研制出第一套飞机用静电悬浮陀螺(ESG)惯性导航系统，其长时间误差仅为 0.02°/h，主要用于对自主导航精度要求非常高的远程军用飞机上，如 B-52 和 F-117A。

至 20 世纪七八十年代，旋转质量陀螺(如空气轴承液浮陀螺、静电陀螺)和动力调谐陀螺等机电陀螺技术基本成熟，在飞机惯性导航系统中得到了广泛的应用，尤其是动力调谐陀螺技术促进了平台式惯性导航系统的发展，不过由于新型光学陀螺、环形激光陀螺(RLG)和干涉型光纤陀螺(FOG)的出现，20 世纪 80 年代后期平台式惯性系统相关的开发工作基本终止。

在同一时期，光学技术和数字计算技术飞速发展，RLG 和 FOG 脱颖而出，使惯性技术发生了从平台式向捷联式的巨大飞跃。RLG 捷联导航系统因其体积小、质量轻、反应速度快和可靠性高等优点，被大量民用和军用飞机所选用。1982 年，霍尼韦尔公司符合 ARINC 704 标准的 RLG 惯性基准系统正式投入民用航线使用。1984 年，美国空军出台了捷联惯性导航系统标准 SNU84-1，并开始了 RLG 惯性导航系统替换机电陀螺系统的工作。同期，海军也用 RLG 舰载飞机惯性导航系统(CAINS-2)取代当时正在服役的动力调谐陀螺基 CAINS-1 系统。20 世纪 80 年代末以后，GPS 与惯性导航的组合系统

成为研究焦点。1993 年初，美国国防部指定美空军牵头研制嵌入式 GPS 接收机的惯性导航系统(EGI)，推动以利顿公司(现属诺格公司)的 LN 100G 和霍尼韦尔公司的 H764G 为代表的 RLG 基 EGI 系统在军用飞机上的大量应用。

FOG 比 RLG 开发略晚，随着 20 世纪 80 年代期间保偏光纤、超辐射发光二极管和多功能集成光学芯片研制成功，其性能得到大幅提高，目前美国的 FOG 已在中高精度导航领域应用。发达国家的惯性技术研制重点已转移至新兴惯性传感器以及传统惯性传感器的小型化和低功耗上，如微机电(MEMS)和片上惯性器件与系统。美国国防部预先研究计划局(DARPA)正在组织诺格等公司研制导航级 MEMS 基惯性测量单元(IMU)<sup>[3]</sup>。就目前应用而言，微惯性器件与系统主要用于微型飞行器和高机动近程战术导弹。

3 惯性技术在航空领域的应用

3.1 主要军用飞机装备的惯性导航情况

20 世纪 70 年代是以第二代战斗机(F-15、F-16 和 Su-27 等)为代表的军用飞机盛产的年代，作战飞机装备的导航系统大多为动力调谐陀螺基系统，如基尔福特 Gyroflex 动力调谐陀螺基惯性导航系统 SKN-2416 装备在美 F-16 战斗机上，利顿生产的 LN 30 装备在美国 F-15 战斗机上，法国幻影-2000 装备的是萨基姆公司研制的 Uliss52。

冷战结束后，很多国家开始削减国防预算，特别是 20 世纪 80 年代中后期，由于 RLG 捷联式惯性导航系统已达到了中等精度性能要求，系统体积、质量和成本仅为同等性能水平的平台惯性导航系统的一半或 1/3，因此备受各国青睐。目前在役主流战机基本使用的是 RLG 捷联式惯性导航系统，典型的机载系统有霍尼韦尔公司的 H423/E 和

表 2 诺格公司 RLG 和 FOG 基 EGI 惯性导航系统对比

参数	LN 100( RLG)		LN 251( FOG)	
	纯惯性导航	组合导航	纯惯性导航	组合导航
定位精度( CEP)	0.8 nm/h	10 m	0.8 nm/h	4 m
速度精度( rms) /( m · s <sup>-1</sup> )	0.76	0.015	<0.8	<0.03
姿态( rms) /( °)	0.05	0.02	<0.05	<0.02
外形尺寸 /cm <sup>3</sup>	27.9 × 17.8 × 17.8		16.9 × 17.8 × 17.8	
质量 /kg	9.8		5.7	
功耗 /W	37.5		25	
MTBF/h	>14 400		>20 000	

H764G 以及诺格公司的 LN 93 和 LN 100G。

目前,国际上 FOG 基惯性导航系统已达导航级,如诺格公司的 LN 251 和 LN 260。LN 251 装备于美国陆军的猎手无人机和美国海军的 E-2 先进鹰眼预警机。LN 260 被选中升级美国空军 F-16 机队<sup>[4]</sup>和美国海军 F-5 虎 II 战斗机<sup>[5]</sup>。

惯性 MEMS 技术因为在体积、质量和成本上的优势,获得众多应用。诺格公司的 MEMS 加速度计基光纤陀螺惯性基准单元 LN 200 IMU 被用于战术导弹和其它稳定及跟踪应用。

3.2 主要民用飞机装备的惯性导航情况

20 世纪 80 年代中后期,环形激光捷联惯性导航系统开始大量装备民机。目前,激光陀螺捷联惯性导航系统在中高精度惯性导航系统中占有相当大的市场,主要民机机型均配置了这种设备。主要产品有:霍尼韦尔公司的 Laseref 系列惯性基准单元( IRU),配套波音 737-300/400/500、747-400、757、767、787 及空客公司 A310、A300-600,以及 Embraer 170/175/190/195 等。诺格公司的激光捷联惯性基准系统 LTN 90-100 用于 A300-600 及俄航的伊尔 96-300 客机; LTN 92 用于波音 747、麦道 DC 10、湾流 II /IV 等; LTN 101 用于包括 A320、A330 和 A340 在内的多种客机和货运飞机。

与当前环形激光陀螺技术相比,光纤陀螺技术所带来的更高可靠性和长寿命对于民用飞机导航市场格外重要。诺格公司的 MEMS 加速度计和 FOG 基惯性基准单元 LTN 101E 被 A380 飞机选用<sup>[6]</sup>, FOG 构成的姿态航向参考系统( ARHS) LCR 92μ 大量装备支线飞机如多尼尔 328、隼 20 及湾流 G 等,以及 S-76、S-92 和贝尔 412 直升机。霍尼韦尔公司

飞航导弹 2017 年第 10 期

FOG 基 AHRS 也用于多尼尔 328、Embraer145 等支线机。

3.3 航空惯性导航系统的演进

EGI 系统是 20 世纪 90 年代末美国海陆空三军联合研制的综合导航系统,主要制造商为诺格公司和霍尼韦尔公司,产品分别为 H764 和 LN 100G,目前装备于大多数主战航空平台上。

诺格公司的 LN 100G 是 RLG 基 EGI,装备于 F-22 和 F-35 战斗机上。LN 100G 的核心部件是 18 cm 光程的四频差动非抖动式零锁激光陀螺( ZLG),角度随机游走达到 0.001°/h,标度因数误差小于 1 ppm<sup>[7]</sup>。LN 251 是诺格目前最新的 FOG 基 EGI<sup>[8]</sup>,在性能和 SWaP 方面比 RLG 基 EGI 系统有了很大改进,如表 2 所示。同样,霍尼韦尔的最新版 H764 虽然仍为 RLG 基系统,但经历这些年后,各方面都有大幅提升,如表 3 所示<sup>[9]</sup>。

目前美国正在通过名为军用 GPS 用户设备( MGUE) 项目升级 EGI,包括升级 GPS 接收机带有 M 码功能,新设备预计 2018 年投入使用<sup>[10]</sup>。

在民用机应用方面,对比霍尼韦尔公司和诺格公司的大气数据惯性基准单元( ADIRU) 主要指标,发现霍尼韦尔公司的 RLG 基产品经过不断改进,在质量、功耗和可靠性方面,相较诺格公司的 FOG 基产品,不相上下,仍然颇具竞争力。

在战术导弹和无人机用战术级 MEMS IMU 方面,霍尼韦尔公司和诺格公司均有系列化产品适于不同应用,典型产品的性能对比见表 4 和图 1<sup>[11]</sup>。通过对比可以看出,两家公司的对等产品性能相当。

表 3 霍尼韦尔公司的老款和新款 RLG 基 EGI H764 主要性能对比

参数	老 H-764	新 H-764	FALAN(小型化)
定位精度(CEP)/(nm·h <sup>-1</sup> )	0.8	0.2	0.2
速度精度(rms)/(m·s <sup>-1</sup> )	0.76	0.5	0.5
姿态(rms)/(°)	0.05	0.05	0.05
外形尺寸/cm <sup>3</sup>	32.4×17.8×17.8	24.9×17.8×17.8	22.9×15.2×15.2
质量/kg	10	<9	5.7
MTBF/h	10 000	>25 000	>25 000

表 4 霍尼韦尔公司和诺格公司的战术级 MEMS IMU 性能对比

参数	HG1900 IMU	μIMU IMU
零偏稳定性/(°·h <sup>-1</sup> )	1	≤3
角随机游走/(°·h <sup>-1/2</sup> )	0.06	0.15
体积/cm <sup>3</sup>	285	340
质量/kg	<0.50	0.68
功耗/W	<3	<8
制造商	霍尼韦尔公司	诺格公司

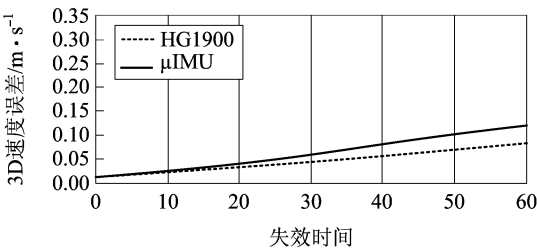


图 1 霍尼韦尔公司和诺格公司的战术级 MEMS IMU 性能对比

4 美国的惯性技术开发与研究

由于 GPS 存在易受干扰、欺骗和在某些环境下不可用等缺陷,美国一直在寻求 GPS 替补技术和解决方案,以打破对 GPS 的高度依赖,其中最主要的努力是 DARPA 体系化开展的相关研究项目。目前 DARPA 正在开展的 5 个定位、导航和授时(PNT)相关项目<sup>[12]</sup>,包括自适应导航系统(ANS)、微小型化 PNT(Micro-PNT)、量子辅助感应和读出(QuASAR)、超快激光科学与工程项目(PULSE)以及对抗环境下时空和方向信息(STOIC),如图 2 所示。

Micro-PNT 项目是开发 PNT 相关的 MEMS 技术。QuASAR 项目旨在制造世界上最精确结实的便携式原子钟。PULSE 项目是应用最新的脉冲激光技

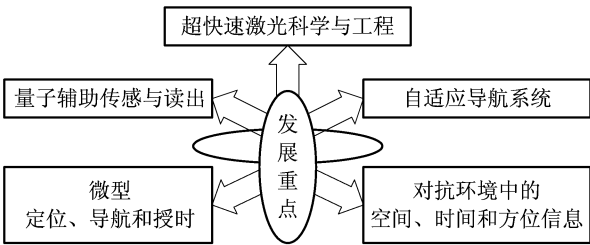


图 2 DARPA 目前开展的 PNT 相关项目

术改进原子钟和微波源的精度和尺寸,从而提高时间和频率的远程同步精度,其成果对 QuASAR 原子钟的应用至关重要。若成功的话,PULSE 技术可以使全球分布的时间精度与世界上最精确的光学原子钟相当。

ANS 项目的目标一是提高 IMU 的性能和降低体积、质量与功耗,二是利用其它信号源定位,三是开发新算法和新架构,实现各种传统和非传统 PNT 传感器的即插即用。STOIC 项目是基于远程基准信号、战术光学时钟和多功能通信系统,开发对抗环境下精度与 GPS 相当但独立于 GPS 的 PNT 方法。

一方面,DARPA 通过一系列项目,从微时钟、微惯性传感器到微综合系统,全方位实施微型化,降低功耗和提高精度<sup>[13]</sup>,如图 3 所示。

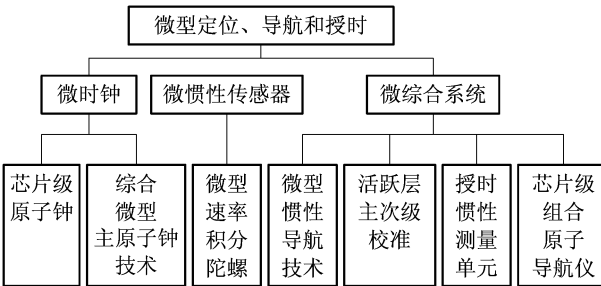


图 3 Micro-PNT 项目组成

在原子钟微型化方面,2004年,DARPA成功开发出芯片级原子钟(CSAC)。2009年,启动综合微型主原子钟技术(IMPACT)项目,进一步提高CSAC的精度和长期稳定性,开发与台式铯原子钟性能相当的下一代芯片级原子钟技术,2011年芯片级铯原子钟实现商业化。在原子钟性能提高方面,2016年启动增强稳定性的原子钟(ACES)项目,开发性能优于DARPA当前一代CSAC芯片级原子钟1000倍、系统体积小于 $50\text{ cm}^3$ 、功耗小于 $250\text{ mW}$ 的电池供电原子钟。QuASAR项目目前已在实验室开发出50亿年误差不足 $1\text{ s}$ 的光学原子钟。

在惯性传感器微型化方面,2011年启动为期3年的微型速率积分陀螺(MRIG)项目,开发导航级可批产的3D微机械振动陀螺,功耗小于 $100\text{ mW}$ 。目前已成功开发体积 $10\text{ mm}^3$ 、衰减时间 $100\text{ s}$ 的半球与酒杯形结构和共振腔体。

在惯性导航系统微型化方面,微型惯性导航技术(MINT)的目的是开发可装在鞋靴内,体积为 $1\text{ cm}^3$ 、功耗为 $5\text{ mW}$ 、导航精度为 $1\text{ m}$ (保持在 $10\text{ h}$ 以上)的INS。活跃层主次级校准(PASCAL)项目在微型化传感器的同时,解决微机械惯性传感器和时钟的长期漂移问题,达到惯性传感器体积小于 $30\text{ mm}^3$ 、功耗低于 $50\text{ mW}$ 、偏移和标度因数误差小于 $1\text{ ppm}$ (百万分之一)/月,实现现场零维护。授时惯性测量单元(TIMU)项目开发3个陀螺仪、3个加速度计和1个时钟一体化的战术级IMU芯片,达到漂移率低于 $1\text{ nm/h}$ ,体积小于 $10\text{ mm}^3$ ,功耗不足 $200\text{ mW}$ <sup>[14]</sup>。芯片级组合原子导航仪(C-SCAN)项目是开发组合传统惯性传感器与核磁共振(NMR)陀螺或原子干涉仪(AI)的片上原子基惯性导航系统,芯片小于 $20\text{ cm}^3$ ,功耗低于 $1\text{ W}$ 。在惯性导航系统精度提高方面,DARPA于2003年启动精确惯性导航系统(PINS)项目,开发基于冷原子干涉仪的高精度IMU;2011年,基于PINS的成果,开展了高动态范围原子传感器(PINS-HiDAR)项目研究。目前AOSense公司已开发出冷原子干涉仪基IMU,漂移率达到 $5\text{ m/h}$ ,下一步是激光器微型化和性能改进。PINS是DARPA在2012年启动的ANS项目重要组成部分之一。

另一方面,DARPA通过开发新系统架构和新飞航导弹 2017年第10期

算法以及新的多功能系统,充分综合和利用各种传统与非传统信息源实现PNT功能。ANS项目的另一组成部分——全源定位与导航(ASPN)项目开发新系统架构,并探索使用芯片级原子钟和非导航的机会信号(SoOP)(如商用卫星、电台、电视信号、移动电话发射塔,甚至闪电等)提供PNT基准点,如图4所示。PINS项目在2017财年进行子系统的演示验证,ASPN项目已完成在陆海空平台上的多次外场演示验证,2017财年进行最后的演示验证<sup>[15]</sup>。

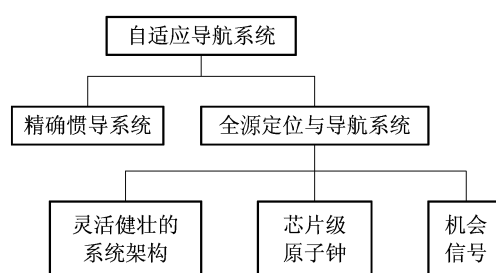


图4 自适应导航系统项目组成

总体来看,惯性技术以其固有的独特性和无可替代的优势,在GPS替补系统解决方案中占据重要地位,成为重点发展的核心部分。无论是MEMS惯性传感器,还是新兴惯性技术,都在快速发展中。

## 5 结束语

近期内会维持RLG和FOG在主流飞机上并存的局面。由于RLG基INS可靠性高、寿命长,因此仍在大多主流飞机上应用,而新研飞机和改进改型飞机大多采用FOG基的导航系统。目前RLG和FOG技术已经非常成熟,实现稳定的量产,如霍尼韦尔的RLG产量已能达到 $17\,000$ 套/年。目前的改进主要是进一步小型化和降成本。MEMS基导航系统目前主要在无人机、平台稳定、飞行控制和民用飞机领域大量应用。相信随着新惯性技术的出现以及导航精度和SWaP+C的不断改进,飞机上的RLG和FOG最终会像传统机械陀螺一样被取代而成为历史。

惯性技术的市场潜力巨大。惯性技术无论对国防,还是工业,乃至个人消费品都发挥很大作用,

特别是人们越来越担心对 GPS 的过度依赖,因此惯性技术的用武之地自然会越来越大。据专业市场研究公司 MarketsandMarkets 在 2016 年 1 月发布的预测报告,未来五年全球 INS 市场将以复合年增长率 (CAGR) 13.81% 的速度增长,由 2015 年的 46.4 亿美元增长到 2020 年的 88.7 亿美元<sup>[16]</sup>。主要驱动因素有飞机数量的增加、对导航精度的要求提高以及部件的微型化和低成本等。

惯性技术是军民两用技术,但更具明显的军用属性,因此备受各国的关注,也一直是西方国家对我国禁售的技术之一。因此我国的高精度惯性技术必须也只能依靠自主研发,才能摆脱受制于人的局面,才能满足我军各种国防武器平台的导航需求。我国导航级 RLG 和 FOG 方面,目前性能基本满足航空应用要求,但可靠性与国外的差距较大(如霍尼韦尔军民导航系统通用的 GG1320 RLG 可靠性超过 45 万小时),规模量产方面也存在差距,相应的成本也较高。惯性技术,无论是 RLG、FOG,还是 MEMS,均属资金密集型高科技前沿技术,20 世纪 80 年代美国军方仅在霍尼韦尔一家公司就投入多达 1.3 亿美元用于研制 RLG。然而,一旦关键技术取得突破,给导航系统带来的是革命性变化。面对国民经济和国防建设的需求,我国导航器件和系统落后制约战机及导弹战斗力发挥的局面亟需改变。我们应呈体系化发展高精度惯性技术,特别是加大对新兴惯性技术的研发力度,促进产学研的有效衔接,实现跨越式发展。

#### 参考文献

- [1] 《世界飞机手册》编写组. 世界飞机手册. 北京: 航空工业出版社, 2011
- [2] Barbour N. Inertial components past, present, and future. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2013
- [3] Northrop Grumman. Northrop Grumman to develop navigation-grade MEMS inertial sensor. <http://news.northropgrumman.com/news/releases>, 2016-03-14
- [4] US Air Force selects Northrop Grumman to provide new, improved navigation system for F-16 fighter. Defense News, 2016-01-06
- [5] Northrop Grumman navigation system selected for F-5 Tiger II. Defense News, 2006-09-12
- [6] Lufthansa selects Northrop Grumman to provide next-generation air data inertial reference units. Defense News, 2006-01-12
- [7] Northrop Grumman. LN-100G embedded INS/GPS (EGI). [http://www.northropgrumman.com/capabilities/ln\\_100ginertialnavinationsystem/documents/ln100g.pdf](http://www.northropgrumman.com/capabilities/ln_100ginertialnavinationsystem/documents/ln100g.pdf), 2013
- [8] Northrop Grumman. Northrop Grumman awarded contract from US Air Force to support GPS modernization. <http://news.northropgrumman.com/news/releases>, 2016-01-06
- [9] Honeywell. Supporting the most challenging military navigation requirements while adding civil interoperability capabilities. <https://aerospace.honeywell.com/EGI>, 2015-06
- [10] John K. Honeywell to upgrade embedded navigation systems that combine GPS and inertial. <http://www.militaryaerospace.com>, 2013-10-10
- [11] NovAtel. SPAN tightly coupled GNSS + INS technology performance for exceptional 3D, continuous position, velocity & attitude. NovAtel Inc, 2016
- [12] DARPA. Beyond GPS: 5 next-generation technologies for positioning, navigation & timing (PNT). <http://www.darpa.mil/news>, 2014-07-24
- [13] Robert L. Micro-technology for positioning, navigation and timing (Micro-PNT). <http://www.darpa.mil/program>, 2013
- [14] DARPA. Extreme miniaturization: seven devices, one chip to navigate without GPS. <http://www.darpa.mil/news>, 2013-04-10
- [15] GPS World staff. DARPA advances on many fronts to reduce reliance on GNSS, GPS World. <http://trove.nla.gov.au/version/243741134>, 2017-02-13
- [16] Markets and Markets. Inertial Navigation System (INS) market by product grade (marine, navigation, tactical, and commercial), technology (RLG, Fog, MEMS, mechanical, vibrating GYRO, HRG), application (defense and commercial platform) and geography-global forecast to 2020. Markets and Markets Research Private Ltd, 2015-12