

北斗多业务卫星系统与应用——论北斗Bs导航*

谭述森,张天桥

(北京卫星导航中心,北京 100094)

摘要:无线电频率是不可再生的资源,频率共用已成为国际电信联盟的共识,多业务融合发展已成为世界卫星无线电系统发展趋势。S频段中2483.5 MHz ~ 2500 MHz被国际电信联盟划分为卫星多业务共用频率,包括卫星无线电定位报告业务、卫星无线电导航业务、卫星移动通信业务三大业务,可以同时提供卫星导航、航路跟踪、遇险救援、信息中继四大功能。介绍了S频段天基系统发展过程、导航通信频率特性、S频段多功能集成前景,我国北斗未来使用S频段导航的应用成果及社会经济效益预测。

关键词:S频段;卫星无线电多业务系统;卫星无线电定位报告业务;卫星无线电导航业务;卫星移动通信业务;多业务频段

中图分类号:TN96.1 文献标志码:J 文章编号:1001-2486(2017)05-001-05

BeiDou multi-service satellite system and application— review on BeiDou Bs navigation

TAN Shusen, ZHANG Tianqiao

(Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Radio frequency is a non-renewable resource, and frequency sharing has become the consensus of the International Telecommunication Union. Multi-service integration has been the development trend of the world radio satellite system. S band 2483.5 MHz ~ 2500 MHz has been allocated into the sharing band of satellite multi-service including radio determinations satellite service, radio navigation satellite service and mobile satellite service by International Telecommunication Union, and is expected to provide four functions: satellite navigation, route tracking, emergency rescue and information relay. The development of S band space based system, the frequency characteristics of navigation communication and the prospect of S band multi-service were introduced, the future application and social and economic benefits of the S band navigation in China were predicted.

Key words: S band; radio multi-service satellite system; radio determinations satellite service; radio navigation satellite service; mobile satellite service; multi-service band

从数学物理概念出发,无线电频率是数不胜数的;但从空间传播特性与工程可行性出发,卫星系统可用无线电频率寥寥可数。国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)认为无线电频率是宝贵的不可再生的资源。其中,被ITU划分为卫星多种业务共用的频率则更少,其带宽只有S频段中2483.5 MHz ~ 2500 MHz共计16.5 MHz^[1]。该频段允许卫星无线电定位报告业务(Radio Determinations Satellite Service, RDSS)、卫星移动通信业务(Mobile Satellite Service, MSS)、卫星无线电导航业务(Radio Navigation Satellite Service, RNSS)共用,显得十分珍贵。中国是卫星无线电业务后发国家,面对世界卫星无线电频率十分匮乏的局面,开展了S频

段多业务兼备设计的尝试,既节约不可再生的频率资源,又节约卫星系统硬件资源,并且可望实现一星多能,提升卫星功能密度。

北斗系统自2000年起,以北斗一号两颗卫星起步,使用国际划分的RDSS规则,实际完成了覆盖中国及周边地区的RDSS与MSS的集成。北斗一号系统运行原理和业务功能,也已成为国际电联对RDSS概念的基本诠释。北斗一号系统的基本特征是将卫星无线电定位、位置报告及短报文通信在同一时间、同一信道完成^[2]。中国自主的卫星导航定位系统,自二十世纪八九十年代开始论证,其“战略定位”必须统筹考虑经费、进度、技术基础等现实约束。经济基础与技术基础双重薄弱是我国的战略短板,走美俄发达国的卫星导航

* 收稿日期:2017-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41604016)

作者简介:谭述森(1942—),男,重庆开县人,中国工程院院士, E-mail:gary_85@163.com

系统发展之路必然碰壁。在当时的背景下,不得不选择节省资源、多功能集成的发展道路。

随后,中国北斗频率设计团队通过 2007—2012 年的努力,在 ITU 众多双边、多边会议中坚持“RNSS 是 RDSS 的子集”原则,成功将 2483.5 MHz ~ 2500 MHz 的 S 频段扩展至卫星导航全球合法频率(落地功率密度上限为 $-129 \text{ dBW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{MHz}^{-1}$)^[3];并强调老系统老规则,新系统新规则。这既确保了北斗一号频率地位,解决了 RDSS 与 MSS 间互相干扰问题,又为北斗未来打下了 RDSS、MSS 与 RNSS 三大业务兼容性发展的前提。中国北斗将这一频率定义为 Bs 频段。按照上述卫星下行信号落地功率密度限值,地球同步轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星等效全向辐射功率(Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP)最高可继续维持 46.6 dBW;中地轨道地(Medium Earth Orbit, MEO)卫星 EIRP 最高限值为 42 dBW,到达地面功率限值为 -146.3 dBW ,这与传统 L 频段 RNSS 信号落地电平限值相当。

RDSS、MSS 与 RNSS 三大业务的集成有着无可估量的发展潜力。不少欧洲学者看到这一美好前景^[4-5],成为 S 频段 RNSS 全球化的倡导者和推动者,可以预测 S 频段未来很可能在伽利略系统出现;印度正在建设的印度区域导航卫星系统(Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS)也使用了 S 频段。除了 S 下行频段,中国北斗还获得了 RDSS 地面至卫星上行业务频率,为 1610 MHz ~ 1626.5 MHz 与 1668 MHz ~ 1675 MHz 频段。这些都是中国北斗 GEO、倾斜静止轨道(Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO)、MEO 三种轨道卫星实现 RDSS、MSS、RNSS 三大业务的宝贵资源。如果北斗实现频率合理利用,北斗系统可由卫星导航系统上升为多业务卫星无线电系统。

1 Bs 频段业务的创立与发展

1912 年,国际电联部分专家基于利用无线电波传播原理可确定物体的位置、速度或其他特性的能力,提出应该规划一个工作无线电测定频段用于用户定位服务。但由于缺乏实践支持,未能安排相应使用频率,也未作无线电业务定义。随着 20 世纪 60 年代卫星技术的迅速发展,在 1971 年 ITU“世界空间通信无线电行政大会(WARC-ST'71)”上,修订了国际无线电管理规则,形成了若干重要的无线电频率管理规则:第一,成员国同

意所有国家有“平等占用”静止卫星轨道(Geostationary Satellite Orbit, GSO)位置和卫星频率的权利;第二,后建发射的卫星系统必须避开对早先系统的干扰;第三,通过了一系列定义以适应所有可能想到的卫星业务。其中,有一种业务是利用卫星确定一个物体的位置、速度和其他特性,并中继这一信息到另一处。这一概念被定义为卫星无线电定位报告业务,并将这一定义写入了 ITU 的国际无线电管理规则之中。

1979 年召开的 WARC'79 会议上,仍然没有任何国家提出 RDSS 频率使用要求。这一年,ITU 接受了美国政府为 GPS 申请的频率,为航空移动卫星业务(Aeronautical Mobile Satellite Service, AMSS)和卫星无线电导航业务划分了业务频段。

1982 年末,美国 G. K. O. Neill 博士取得了星空中交通管制和防撞系统的专利,并创立了 GeoStar 公司。1985 年美国联邦通信委员会制定了基于扩展频谱调制的 RDSS 标准,业务包括语音、定位及报文通信,定位精度为 300 ~ 400 m,共授权了四个系统开展 RDSS,其他三个系统分别是:TRW 公司的 Odyssey 系统、LoralQualcomm 公司的 Globalstar 系统、Constellation Communication 公司的 Constellation 系统。

1987 年 10 月 ITU WARC-MOB'87 会议在日内瓦召开,正式将 S 频段 2483.5 MHz ~ 2500 MHz 划分为 RDSS 卫星到地面的下行工作频率;L 频率 1610 MHz ~ 1626.5 MHz 划分为 RDSS 上行频率,且为主要业务。由于各地方政府态度不一致,最终 RDSS 的 L 上行在 2 区(南北美洲)为主要业务,在 1 区(欧洲、中东、非洲)和 3 区(亚太)为次要业务;当然,当时并未成为现实的 RDSS 概念在中国也被划分为次要业务。

在 1992 年 2 月至 3 月在西班牙召开的 WARC'92 大会,再次将 S 频段和配对的 L 频段分配为主要业务。经过中国政府的努力,3 区(亚太)RDSS 的 S 频段成为主要业务。1997 年举行的 WARC'97 大会上,由于北斗建设需要,中国政府推动将 L 频段中 1610 MHz ~ 1626.5 MHz 在 3 区(亚太)上升为主要业务。中国将北斗一号所用的 L/S 频段同时申报为 RDSS 与 MSS。所以,北斗一号从建设之初就以 RDSS、MSS 双重业务进行系统建设,是世界上第一个将卫星定位报告与卫星移动业务相融合的卫星无线电系统。

2000 年前后,美国建立的全球 MSS 卫星移动系统有三个:一个是以 66 颗卫星组成的 Iridium 系统,另两个是利用 S 频段为空对地业务的

Odyssey 和 Globalstar 系统,前面提到的 Constellation 系统则未能成功。欧洲建设了以 GSO 为轨道的 INMARSAT 系统。然而,全球移动通信需求旺盛的局面并没有带动卫星移动业务的蓬勃发展,反而使其堕入低谷,其主要原因是地面移动业务和光缆通信以廉价而高效的态势使全球四大卫星移动业务系统营收不佳,有的甚至破产。只有兼具定位业务和生命救援业务的 INMARSAT 系统应用相对广泛。技术最先进的 Iridium 系统最终在美国军方支持下才勉强度日,并且为新的 Iridium 系统注入了与 GPS 定位及遇险安全报警有关的业务。而同时兴起的全球卫星导航系统,则由最初美俄的 GPS 与 GLONASS 两大系统,一跃成为包括中国北斗和欧洲伽利略在内的四大全球系统^[6-9]。度量空间和时间的卫星导航系统与卫星通信系统形成剪刀式发展态势,一个上升,一个下降,这不得不引起对卫星无线电系统发展方向的思索。

2007年,欧盟23个成员国在 WARC'07 大会提出了将 2483.5 MHz ~ 2500 MHz 列入全球 RNSS 的方案,获得包括中国在内的多数成员国的支持。倡议被列入 ITU 1.18 议题,开展了大约 6 年的可行性与兼容性协调,中国赵晓东先生担任亚太电信联盟预备会会议议题起草小组主席,为 ITU-R WP4C 会议最终形成大会准备会议 (Conference Preparatory Meeting, CPM) 报告做出了努力。RDSS 与其他业务间的共用研究表明:当 RDSS 达到地面功率流密度 (Power Flow Density, PFD) 限值为 $-129 \text{ dBW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{MHz}^{-1}$ 时,除无线电定位业务 (Radio Location Service, RLS) 之外, RDSS 与固定业务 (Fixed Service, FS)、移动业务 (Mobile Service, MS)、卫星移动通信业务间共用是可行的。中方在确保北斗一号系统 S 频段 RDSS 利益的基础上,同意 RDSS 全球扩展;欧洲无条件支持 RDSS 全球扩展;美国在保证 MSS 系统 (主要指 Globalstar) 利益的前提下,支持 S 频段 RDSS 全球扩展;日本、印度同意全球扩展。在 WARC'12 大会上,2483.5 MHz ~ 2500 MHz 频段 RDSS 全球扩展获得 ITU 正式审议通过。

中国北斗卫星导航系统率先于 2015 年 7 月 25 日和 9 月 30 日分别发射了 IGSO 卫星和 MEO 卫星,实现了 2483.5 MHz ~ 2500 MHz 频段 RDSS 全球化尝试。尤其是 IGSO 卫星实现了基本导航信号多波束功率合成,其 EIRP 达 39 dBW,为 S 频段基本导航打下了良好技术基础,也为 IGSO 卫星大容量 RDSS 定位报告能力创造了条件。在三

颗 IGSO 卫星下,可满足地球两极地区的战略覆盖。

2 导航定位信号频率特性需求与评价

2.1 自由空间传输损耗

卫星导航、卫星通信等移动业务一般选用在大气空间直线传播的 L, S 频段。它们在自由空间传输损耗与工作信号频率可描述为:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi)^2 d^2 f^2 L} \quad (1)$$

式中: P_t 为卫星发射功率; G_t 为卫星发射天线增益; G_r 为用户接收天线增益; d 为卫星发射天线与接收机天线间距,单位 m; f 为信号工作频率,单位 Hz; L 是与传输无关的系统损耗因子,系统设计后可视为常数; $P_r(d)$ 为接收到的信号功率,单位 W。

式(1)表示,工作频率越高,传输损耗越大,用户接收到的功率就越小。当用户接收功率 $P_r(d)$ 确定时,为降低传输损耗,信号频率选 L 频率比 S 频率具有优势, L 频率 (1575.42 MHz) 与 S 频率 (2491.75 MHz) 损耗低 2.5 倍 (约 4 dB)。当导航信号选 S 频率时,恶意干扰源的代价将比 L 频率相对提高。所以在链路损耗方面,基本导航选择 S 频率“得失”相当。

2.2 电离层延迟误差

电离层延迟误差 Δ_s 与频率的关系为:

$$\Delta_s = \pm \frac{40.31}{f^2} TEC \quad (2)$$

式中: TEC 为传输路径上的总电子含量。

依据上述模型可知,电离层延迟修正误差 Δ_s 与 f^2 成反比。

最早的 L1 频率 (1575.42 MHz) 的电离层传输延迟修正误差是 S 频率 (2491.75 MHz) 的 2.5 倍。因此,仅从单频测距精度而言, S 频率测距精度将明显优于 L 频率的。同时,由于 L, S 双频之间频差较大, S/L 双频组合进行电离层修正的精度也明显高于现有导航 L/L 双频组合的。所以,无论是单频定位系统还是双频定位系统, S 频率定位精度都有优势。

2.3 对流层影响

对于频率小于 30 GHz 的电磁波,对流层延迟是非色散的,对流层与频率基本无关。

2.4 水蒸气(氧气)吸收

产生大气吸收损耗的主要成分是氧气、水蒸气及水汽凝物。0.3 GHz ~ 10 GHz 频段,大气损

耗最小,故称此频段为无线电窗口。

2.5 雨衰

电波通过雨水传输引起的电波衰减量与信号频率及雨量厚度相关。其中 L, S 频段均受雨衰影响较小,二者差距不大。

2.6 天线增益频率特性

天线增益公式为:

$$G = 10 \lg \left[\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta \right] \quad (3)$$

式中: λ 为信号波长,单位 m; D 为天线口径,单位 m; η 为天线效率。

当天线口径 D 一定时,使用的频率越高,天线增益就越高。卫星导航均用此规律设计区域增强导航信号。理论与实践表明:当使用 Bs 频率时, $D = 2.0$ m, $G = 22$ dB, 配备 100 W 功率放大器 2 只,到达地面的接收功率可达 -145 dBW,与通用地面导航信号相比增强了 13 dB。不同口径天线尺寸增强性能见表 1。

表 1 Bs 频率下到达点信号功率与卫星天线口径关系

Tab. 1 Relationship between received power of Bs signal and antenna caliber

天线口径/m	Bs 信号功率与通用所需功率之差/dB	到达地面功率/dBW
1.6	11	-147
2.0	13	-145
2.5	15	-143

2.7 卫星多业务频率配置与兼容

国际电联多业务频率配置是:卫星至用户下行频率为 2483.5 MHz ~ 2500 MHz,用户至卫星的上行频率为 1610 MHz ~ 1626.5 MHz,这一对频率一直是北斗系统正常运行的应用频率。前文主要阐述了 S 下行频率的有关分析,下面以全球定位报告系统为例,阐述 MEO 卫星上行信号参数设计及频率兼容可行性分析。

为满足全球定位报告无缝覆盖需求,卫星接收天线应为对地覆球波束,MEO 卫星对地波束宽度为 26° ,对 1.6 GHz 频段的最佳天线口径为 0.82 m。最佳 $G/T = -12$ dB/K。为满足用户发射功率约束值及用户救援条件,用户截止角必须在 30° 以上,24 颗 MEO 卫星可满足 100% 二重覆盖,12 颗卫星满足全球 100% 单重覆盖。

北斗卫星必须解决 B1 频点发射信号与 1610 MHz ~ 1626.5 MHz 接收信号的隔离度问题,

中国北斗双模用户机已实现了在这两个频点上的妥善隔离。卫星上的收发隔离正好与用户机天线为互异关系。双模用户机收发天线尺寸小,相位中心几乎重合。但卫星收发天线间距大,可做到较好的空间分离。除去两种天线载荷的差异和相位中心的差别,MEO 卫星天线收发隔离比北斗双模用户机具有 7dB 优势。所以,B1 信号对接收信号的影响可以不在 B1 发射系统端做任何调整下实现。

选用 1610 MHz ~ 1626.5 MHz 作为上行频率,北斗实际运行 17 年的现实表明与 Iridium 系统、Globalstar 系统兼容共存,未发现实际干扰,已实现了多系统频率兼容性。在高纬度地区用户采用 1668 MHz ~ 1675 MHz 频率,还可实现对 INMASAT 的兼容,拓展了北斗系统频率资源。北斗将有 2 个频段实现入站用户的分群,既有利于系统安全,又增加了用户容量。

3 Bs 信号的发展前景

评价 Bs 信号发展前景,必须纵览中外卫星无线电系统发展历程,提升观察视野。北斗系统是中国百年大计,以百年之眼光策划顶层设计,是我们这一代人的责任。回顾世界卫星导航发展史,颠覆性的体制变革是发生过的。在第一代全球导航卫星系统子午仪、圣卡达发展仅 10 年后的 20 世纪 70 年代,GPS、GLONASS 系统用 MEO 星座代替了前者的极轨 LEO 星座,L 频段代替了前者的超高频(Ultra High Frequency, UHF)频段。推翻一个旧系统、建立一个新系统的教训十分深刻。

21 世纪以来,基于 L 频段的卫星导航全球系统与区域系统数量激增,授权与公开服务信号数量更是迅猛增加,使得 L 导航频段不堪重负。系统与信号数量的增加,不但未使导航性能提升,反而使各系统性能恶化。为应对破损割据的频谱资源,信号调制技术日趋复杂,增加了应用终端的技术难度和实现成本,最终为成果推广增加了难度。北斗系统在 L1 频段更处于弱势地位,既受 GPS L1 强信号压制,又要兼顾定位报告接收信号受到的带外功率限制,除 B1C 信号外,使用性能收到较大限制。

中国北斗选用与 L 频段特性最相近的 S 频段作为新的导航频率是明智的。作为先发系统的 GPS、GLONASS 已占据足够带宽的最佳 L 频段;同为后起之秀的伽利略系统表现出了对 S 频段的热情。作为 ITU 所划分的合法导航频率,Bs 工程可行性已在三种轨道卫星上得到验证,更加诱人

的是ITU给予RDSS、RNSS、MSS三重业务共用的合法性,抢先建成Bs业务系统的机会稍纵即逝,失不再来。

下面以RDSS、RNSS、MSS三种业务为目标分析Bs频率对中国卫星多业务无线电系统的贡献。

1)扩展北斗导航信号频带宽度的必然选择。无线电系统服务性能与所占频带宽度成正比,实现距离及时间测量任务的导航定位系统需要更宽的频带密度。选择Bs导航,虽然只有16.5 MHz带宽,但其伪码速率、抗干扰性能、相关解调特性都优于高阶二进制偏置载频(Binary Offset Carrier, BOC)调制的L1频段信号。

2)北斗区域信号增强的必然选择。卫星导航信号本身十分微弱,为满足复杂电磁环境需要,区域增强是可选手段。GPS选用了最佳频率L1为增强手段,而中国北斗若选择B3频点,其功率增强天线直径将是GPS L1天线的1.24倍。GPS增强天线口径为3.0 m,北斗将为 $D=3.72$ m;而如果选用Bs频率,其效果见表1。

3)实现三种任务、四大功能一体化的必然选择。在ITU的无线电频率使用规则中,只有2483.5 MHz~2500 MHz具有RDSS、RNSS、MSS三种业务选择,与此相匹配的上行频率为1610 MHz~1626.5 MHz。北斗三种轨道卫星均实践这一任务,可满足中国及周边(G区),亚太(I区),全球(M区)不同地域不同人群需要,将北斗单一导航功能扩展成卫星定位、航路跟踪、生命救援、数据传输四大功能,其战略价值将非常显著。

4)彻底摆脱海上航空遇险报告束手无策的局面。北斗广义RDSS定位报告技术的精髓是:①应用终端接收卫星下行信号,快速完成时间同步,发射遇险报告信号,地面控制段根据用户及卫星获得的伪距观测量,得到卫星钟与用户本地时间的钟差。②运行控制系统根据用户对三颗卫星的伪距观测,即可获得用户位置。上述运行机理的优点是:①运行控制系统得到用户位置的报告响应时间为1 s;②在相同星座卫星数下,三星距离定位的卫星观测几何因子,比四星伪距定位更小;③Bs信号电离层校正残差优于L频率,报告定位精度在2~3 m。基于“秒米”的时空响应特性,为海上航空遇险信号报告提供几乎接近100%的概率。

5)应用终端装备最简化的选择。北斗系统具有的三种业务四大功能的应用终端仅需接收Bs信号、发射L频率信号,大幅度降低了应用终端复杂度和实现成本,有利于应用推广。

6)卫星无线电系统高度集成的选择。北斗系统增加了Bs信号,可以实现RNSS、RDSS、MSS三种业务四大功能的全球覆盖,成为当今世界少有的高效多能卫星系统,其经济社会效益不可低估,可望以较小代价推动我国由航天大国走向航天强国。

4 结论

S频段(2483.5 MHz~2500 MHz)三种业务集成一体的使用规则,是国际电信联盟专家经过长达6年兼容性分析协调的结晶,是1960年至今用频效益最大化的典型频段,是中国频率工作“走出去”的重要成果。中国为此频段业务定义、实践和规则的制定做出了重要贡献。可以预测,Bs频率的综合应用将使北斗更加灿烂。

参考文献(References)

- [1] 谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2010.
TAN Shusen. The engineering of satellite navigation[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 谭述森. 广义RDSS全球定位报告系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
TAN Shusen. The comprehensive RDSS global position and report system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [3] 谭述森, 李琳. 北斗系统导航定位报告体制与工程技术[J]. 导航定位学报, 2013, 1(3): 1-5.
TAN Shusen, LI Lin. BDS radio determination satellite system and engineering technology[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(3): 1-5. (in Chinese)
- [4] 罗思布拉特. 卫星无线电测定业务和标准[M]. 童凯, 译. 北京: 国防工业出版社, 1989.
Rothblatt M A. Radiodetermination satellite services and standards[M]. Translated by TONG Kai. Beijing: National Defense Industry Press, 1989. (in Chinese)
- [5] Kayloe J R. Space-based navigation technical planning integrated product team, 1997 overview[C] // Proceedings of the National Technical Meeting "Navigation 2000", Long Beach, California, 1998.
- [6] El-Naga S, Carter C R. Identification techniques for Sarsat signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(2): 199-214.
- [7] Alegre-Godoy R, Stojkovic I. Improving the availability of the SAR/Galileo return link service via network coding[C] // Proceedings of the Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals, 2015: 1-6.
- [8] Cinar T, Ince F. Contribution of GALILEO to search and rescue[C] // Proceedings of the 2nd International Conference on IEEE, Recent Advances in Space Technologies, 2005: 254-259.
- [9] Nicolau V B, Coulon M, Grégoire Y, et al. Performance of TOA and FOA-based localization for Cospas-Sarsat search and rescue signals[C] // Proceedings of the 5th International Workshop on IEEE, Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing, 2013: 312-315.