

# 基于数字多波束星载多通道 VDES 设计

王文伟, 张 喆, 谷晓鹰, 刘宇宏, 林 伟, 戴 琳

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 阐述了甚高频数据交换系统(VDES)系统产生背景, 针对目前普遍存在的系统通信速率受限以及自动识别系统(AIS)时隙冲突问题, 提出一种全双工射频通信频段设计方法和时隙冲突解决途径。通过采用多个射频通道以及多个波束合成, 利用阵列天线和数字波束合成(DBF)技术, 将卫星大覆盖范围划分为多个相互独立区域, 缩小单个天线波束视场覆盖范围, 减少单波束范围内船舶数量, 能有效降低 AIS 信号时隙冲突。以 600 km 卫星轨道为例, 介绍了 8 通道及 8 个波束 DBF 设计方法, 对波束视场和天线增益等进行了仿真计算。结果表明: 多波束可覆盖  $\pm 42^\circ$  视场角范围, 单波束视场角最大为  $\pm 14^\circ$ 。

**关键词:** 甚高频数据交换系统(VDES); 自动识别系统(AIS); 数字波束成形(DBF); 时隙冲突; 全双工

**中图分类号:** TN 967.7      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.04.015

## Design of Spaceborne Multi-channel VDES Based on Digital Multi-beam

WANG Wenwei, ZHANG Zhe, GU Xiaoying, LIU Yuhong, LIN Wei, DAI Lin

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** The background of VHF data exchange system (VDES) is introduced. Aiming at the drawbacks of communication rate limitation of VDES and slot collision of automatic identification system (AIS), a frequency division duplex (FDD) method and a slot collision solution are proposed. By designing multiple radio channels and beams, making use of digital beam forming (DBF), the wide range of satellite coverage can be divided into several independent zones, and the number of vessels within single beam range will decrease corresponding, which can effectively reduce the slot collision. A design of 600 km satellite orbit is illustrated, in which a DBF solution using 8 channels and 8 beams is demonstrated. The simulation results indicate that the range of antenna beam is  $\pm 42^\circ$  by adopting DBF. In case of disabled channels on orbit, a solution of DBF reconfiguration is clarified briefly in the end of the paper.

**Key words:** VHF data exchange system (VDES); automatic identification system (AIS); digital beam forming (DBF); slot collision; full duplex

## 0 引言

船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)能在船对船和船对岸之间自动交换来自船舶传感器的船舶信息(动态数据)、人工输入的静态信息(船舶长度和宽度等)和航次相关信息(船舶吃水、目的港、货物等), 具有接近实时跟踪、对地稳定性、丢失目标可能性小等传统雷达所不具备的优点<sup>[1]</sup>。在 AIS 技术出现之前, 辨识他船是否存在, 以及判断他船操船意图往往只能依赖于雷达显示

屏上的一个物体光点或驾驶员的视觉。在船舶海上碰撞事故中, 有许多案例是因为船载雷达和甚高频(Very High Frequency, VHF)设备不能及时解决船与船之间有效沟通, 以及相互掌握对方船舶信息与操船意图而引发的, 例如 2003 年 5 月 31 日发生的“富山海”轮与“GDYNIA”轮船碰撞事故。

国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)要求 300 总吨及以上的国际航行船舶在 2004 年 12 月 31 日前全部强制配备安装船载 AIS 设

收稿日期: 2020-06-23; 修回日期: 2021-06-01

作者简介: 王文伟(1982—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为 VDES 载荷系统设计与射频收发系统设计。

备。随着 AIS 用户的不断增加,越来越多的船对岸、船对船、岸到船之间需要更大的数据交换,将会导致更大的数据交换需求。考虑到 AIS 只是一个导航系统,并不适合数据交换,国际航标协会(International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, IALA)和国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)于 2013 年提出甚高频数据交换系统(VHF Data Exchange System, VDES)概念,建议将 VDES 作为 e-航海的主要通信链路并获得 IMO 的认可。

VDES 由 AIS、特殊应用报文(Application Specific Maritime, ASM)、VDE 和卫星等部分组成,VDES 卫星充分发挥卫星天然的大范围覆盖优势,将地面 VDES 扩展到海岸覆盖之外的全球范围,掌握全球船舶的整体态势。VDES 在集成了现有 AIS 功能的基础上,增加了特殊应用报文和宽带甚高频数据交换(VHF Data Exchange, VDE)功能,为不同内容及格式的信息划分了“专用车道”:与航行安全关系最为紧密的船舶位置和航行状态信息保留在 AIS 专用信道下,减轻该信道负担,并保证其不被占用;剥离与导航无关的非安全信息,例如水文、气象等由 ASM 承载,并为其配置两个 25 kHz 的信道;而对于其他内容更为丰富、格式更为灵活的信息,则将由 VDE 完成传输,并依托 100 kHz 的双频信道,大大提高船舶及船岸之间信息传输速率<sup>[2-3]</sup>。

在 VDES 中,卫星起到的作用与 AIS 相同,即拓展了岸基服务的范围,使得区域性服务变成了全球性服务,随着海上通信需求的增加,VDES 系统仍然面临着 AIS 链路负荷过重的情况。ITU 等国际组织不断对 VDES 标准进行更新,通过世界无线电大会(WRC-12/15/19)决议调整相关管理规定和频道分配,确保 VDES 系统通信频段和通道规划更加合理高效,各研制单位不断提出新的设计方法提高 AIS 通信能力。目前国内外 AIS 卫星载荷均存在时隙冲突影响检测概率的情况,国内 AIS 载荷在船舶密集的东南沿海,星载 AIS 接收信号时隙冲突高达 8~10 重,导致某些区域检测几乎空白。VDES 系统研究尚处于标准拟定阶段,部分技术及通信体制还需进行论证和试验,上海航天电子技术研究所、国防科大、北京和德宇航、电科十所、东南大学等单位在 VDES 领域开展了大量技术研究并发射试验卫星,确保我国在该领域研究水平保持在世界前列。

本文结合目前正在开展的某研制任务,针对最新的 VDES 射频通道划分,提出基于 DBF 多通道 VDES 设计,利用阵列天线和 DBF 技术同时形成多个波束,将大范围通信“分割”成多个小的区域。通过缩小单个天线波束的视场覆盖范围,减少 AIS 信号时隙冲突,提高 AIS 观测时间和目标检测概率同时也能满足大幅宽海域视场覆盖范围。

## 1 设计方案

VDES 分系统主要由 8 个天线单元、射频收发机(8 个射频通道)和通信处理等组成,如图 1 所示。

天线单元接收船舶和岸基等 VDE 射频信号,送给射频收发机进行处理。在射频收发机内,所接收射频信号经过微波前端的窄带滤波、下变频处理,并对中频信号放大后,送至通信处理机 A/D 转换电路进行模数转换。通信处理机内部 FPGA 对采样数字中频信号进行数字滤波、下变频、添加采样点起始标志、打时间标签等处理,或者根据地面指令对数据进行解调处理,并对解调后的数据加解调标志。

由于 VHF 频段收发频率十分接近,为精简体积采用收发天线共用设计方式,通过环形器将收发信号进行隔离(隔离度典型值为 25 dB),天线数量为  $2 \times 4$ ,共 8 个天线单元。考虑到链路增益较大,目前国内外同类型接收机均设计为非直接放大模式,本方案中射频收发机采用一次下/上变频模式,合理设计链路增益,能有效提高通道稳定性,并可在中频加强滤波,提高系统的抗干扰能力。

通信处理机是本方案核心单机,需接收 8 个通道的 AIS1、AIS2、LAIS(Long AIS,长距离 AIS)1、LAIS2、ASM1、ASM2 和 VDE 中频信号,中频信号在单机内部进行模数转换、接收数字 DBF 波束合成、数字下变频和数字解调,输出所有中频信号解调结果;同时需具备 VDES 协议层处理的能力,并按照协议对 8 个通道进行 VDE 数字调制和发射 DBF 数字波束合成,输出 8 个通道 VDE 中频信号。

AIS/VDE 分系统的主要电性能技术指标如下。

- 1) 工作频段 156 ~ 162 MHz;
- 2) 调制方式及速率  
AIS/LAIS:GMSK(9.6 kbit/s)  
ASM: $\pi/4$  QPSK(9.6 kbit/s)

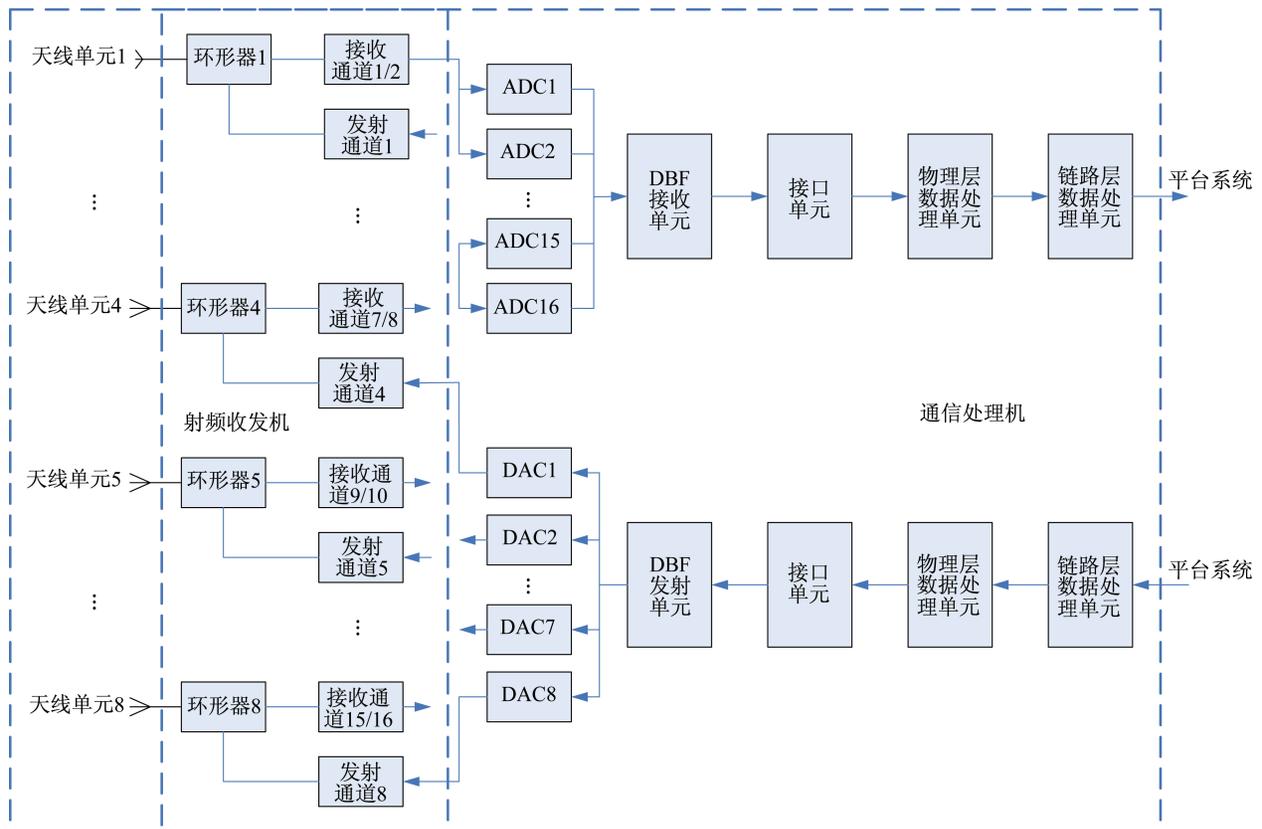


图 1 VDES 系统框图

Fig.1 Diagram of VDES System

- VDE 上行:  $\pi/4$  QPSK 和 8 PSK (33.6 kbit/s);
- VDE 下行:  $\pi/4$  QPSK (33.6 kbit/s);
- 3) 波束宽度  $\pm 42^\circ$  (多波束合成);
- 4) 波束极化方式为圆极化(右旋);
- 5) EIRP  $\geq 33$  dBm;
- 6) 波束数目 8;
- 7) 通道隔离度  $\geq 25$  dB;
- 8) 噪声系数  $\leq 3$  dB;
- 9) 接收灵敏度优于  $-110$  dBm@PER  $\leq 10\%$ ;
- 10) 检测概率: AIS/LAIS 船舶检测概率  $> 90\%$  (300 s 侦察覆盖范围内船舶数量 3 000 艘)。

## 2 全双工设计

2015年 WRC-15 对 VHF 频段海事通信频段进行了分配,使 AIS 功能得到充分发挥,将无线电频道 CH75 和 CH76 作为卫星检测长距离 AIS 频道, CH2027 和 CH2028 作为 ASM 专用频道, AIS 仍然使用原有频点,同时建议 VDE 通信上行采用 CH1024/1025/1026/1084/1085/1086 频道,并规定 VDES 卫星部分不应对数字选择呼叫 (Digital

Selective Calling, DSC)、AIS、语音遇险、安全和呼叫信道造成有害干扰<sup>[4]</sup>。

WRC-19 会议对《无线电规则》进行了修订,涉及卫星水上移动业务(地对空和空对地)进行新的频谱划分,包括卫星上行的 156.012 5 ~ 157.437 5 MHz 和下行 160.612 5 ~ 162.037 5 MHz,以确保不会降低现有 VDES 地面部分、ASM、AIS 运行质量,也不会对低端相邻频段、高端相邻频段内现有业务造成有害干扰和限制<sup>[5]</sup>。

欧洲、日本、美国、加拿大以及中国等均在 WRC-19 会议上提出各自的频谱和通道规划方案,所有方案目的是为了提提高 VDES 系统通信速率,促进 VDES 全球发展。未来 VDES 卫星系统将朝全双工通信方向发展,理论上通信速率是单工或半双工通信的 2 倍以上。

收发频率干扰是目前限制和影响 VDES 系统全双工通信的主要因素。VDES 卫星系统收发工作频率范围为 156 ~ 163 MHz。考虑到收发天线共用,发射机(输出功率大于 1 W)工作时必将影响接收机。由于相对带宽较窄,无法在链路上通过滤波将发射

信号进行滤除,使用限幅器、自动增益控制、饱和放大等方法会恶化接收机噪声系数,影响解调性能。

根据 WRC-15 规定所设计的一种 VDES 频谱<sup>[6-7]</sup>,如图 2 所示,VDES 卫星下行频率范围为 161.787 5~161.937 5 MHz,紧邻 ASM 和 AIS 通

道,当 VDES 下行工作时,发射机宽带噪声和强功率将会影响接收机及相邻信道。基于现有海事领域 VHF 频段通道规定,可设计一种频分全双工(Frequency Division Duplex,FDD)通信模式,频谱如图 3 所示。

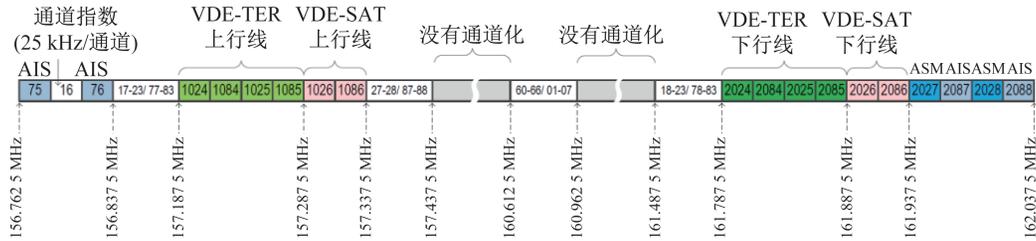


图 2 VDES 频谱

Fig.2 VDES spectra

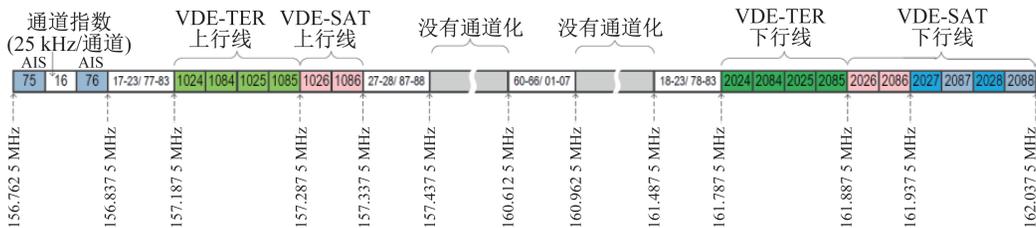


图 3 VDES 修订频谱

Fig.3 Revised VDES spectra

图 3 中,将 VDES 卫星上下行频率分开,其频率间隔大于 4 MHz,在该频段利用常规的声表、LC 等类型滤波器就能将收发频率进行隔离,在共用收发天线设计的情况下,可大大缓解环形器压力,且能确保接收机性能无恶化。在此方案中,VDES 上行带宽可大于 1 MHz,能有效保证 AIS 等高优先级通信资源,下行带宽达到 250 kHz,能提供更强更可靠的数据交换能力。

### 3 波束覆盖范围分析

AIS 使用自组织时分多址接入(Self-Organized Time Division Multiple Access,SOTDMA),自组织小区的范围为以当前船舶为中心的 20 n mile 半径圆形区域,通过采用时隙预约机制在自组织区域内通信信号之间不会出现冲突,而对于星载 AIS 系统,其覆盖范围内包含多个自组织小区,各小区间信号相互独立,来自不同小区的船舶 AIS 信号到达卫星时,发生碰撞的概率很大,两个或多个信号叠加,在卫星接收端极可能产生时隙冲突<sup>[8-10]</sup>。星载 AIS 系统需要解决的一个主要问题就是接收 AIS 信

号的冲突问题,缩窄天线波束(减少接收范围内船舶数量)和增加通道数量是目前星载 AIS 载荷目标检测概率提升的主要技术途径。

两个叠加信号分解,需确保在时域、频域、空域、码域、极化域和能量域的任一个域中是可分辨。AIS 信号在码域及极化域不可分辨,能量域只能舍去低能量船舶信息,考虑到不同船舶的 AIS 信号多普勒频移的差异性,最有效的方法是采用波束锐化实现空域隔离。为侦查尽可能多的船舶数量,需尽量扩大整个天线视场覆盖范围,保证整个天线视场覆盖范围又缩小单波束扫描范围,只能采用多个波束的设计方法,通过多个窄波束合成一个视场范围大的扫描范围。

本方案设计用于 600 km 飞行轨道,天线单元和射频通道数量均为 8 个,拟设计波束数量为 8 个。考虑到 VHF 频段波长较长,在确保波束范围较小的前提下,需面临天线物理尺寸较大的缺点<sup>[11]</sup>,且目前该频段常用的八木天线、螺旋天线、振子天线等在进行多通道设计时需解决多天线地面收拢、在轨可靠展开等工程难点<sup>[12]</sup>。考虑到薄

膜天线性能以及技术成熟度,以及后续阵面数量的可扩展性(扩展至 64 单元以上)拟采用 VHF 频段薄膜天线,单排 4 个波束可使方位方向覆盖范围达到  $\pm 42^\circ$ ,沿飞行方向将波束设计为两排平行,波

束覆盖范围如图 4 和表 1 所示。可增加波束覆盖范围内船舶通信时间,进一步提高时隙冲突解决能力(观测时间增加,能提高时隙冲突解调能力)。

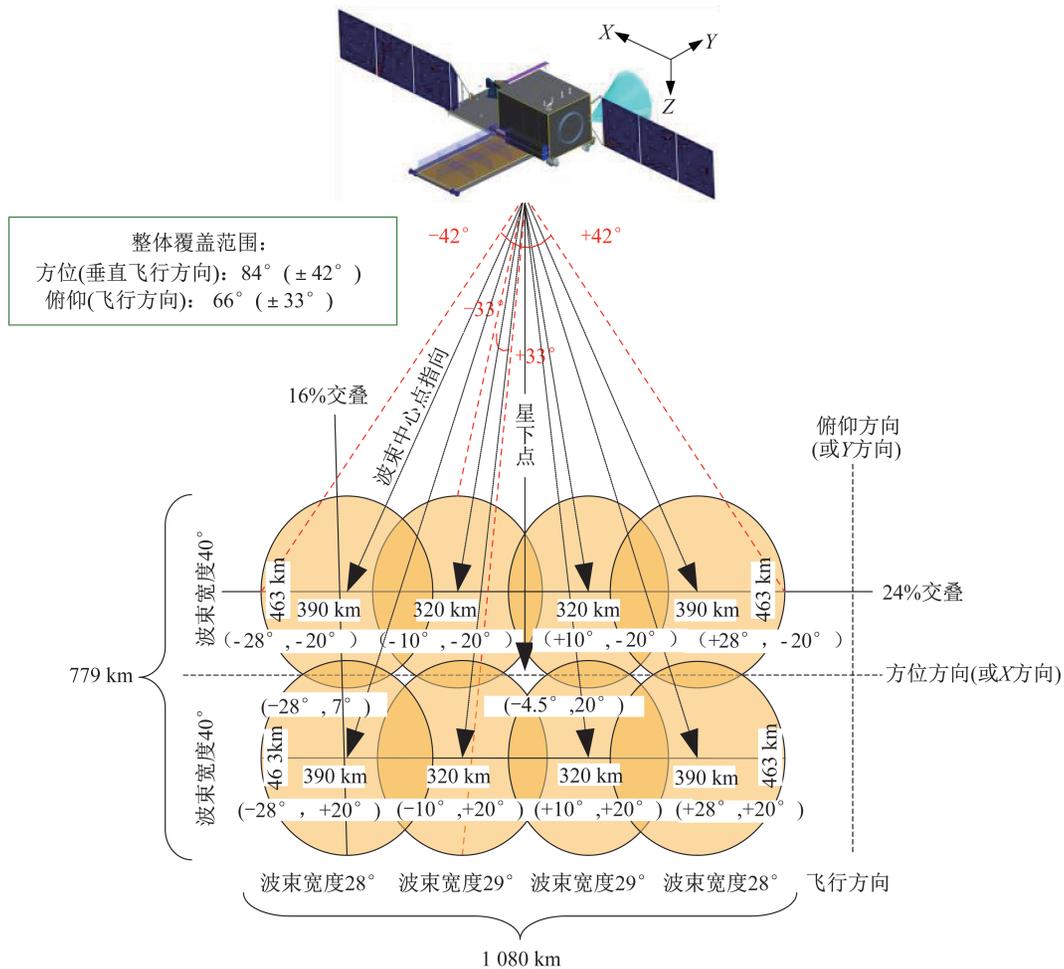


图 4 VDES 波束覆盖示意图

Fig.4 Beam coverage diagram of VDES

表 1 VDES 波束覆盖情况(未考虑地球曲率)

Tab.1 Beam coverage of VDES(reckon without the curvature of the Earth)

描述项	1	2	3	4
波束宽度(方位向/ $^\circ$ ) $\times$ 俯仰向/ $^\circ$ )	$\pm 18^\circ \times \pm 20^\circ$	$\pm 10^\circ \times \pm 20^\circ$	$\pm 10^\circ \times \pm 20^\circ$	$\pm 18^\circ \times \pm 20^\circ$
覆盖面积(方位向直径/km $\times$ 俯仰向直径/km)	463 $\times$ 390	463 $\times$ 320	463 $\times$ 320	463 $\times$ 390
整体覆盖范围(方位向,俯仰向直径)	$\pm 42^\circ \times \pm 33^\circ, 1\ 080\text{ km} \times 779\text{ km}$			

由图 4 和表 1 可知,通过多波束划分,可极大减少单波束覆盖范围内船舶数量,由于各波束相互独立,等效为整个波束覆盖范围内船舶数量减少约 1/4,系统解调能力可提高 50% 以上。

#### 4 数字多波束设计

DBF 是利用数字电路方法实现相控阵列天线,获得不同的波束指向的阵列图如图 5 所示。通过数字信号的控制改变各个阵列单元的信号幅度和相

位,调整阵列辐射场的特性<sup>[13]</sup>。

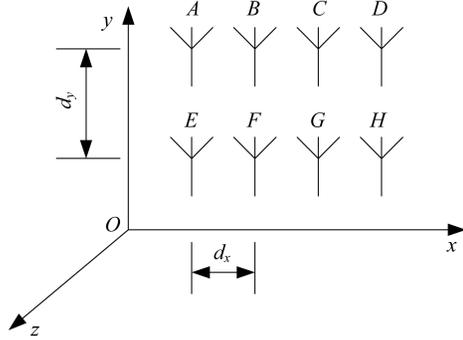


图 5 平面阵列天线

Fig.5 Planar-array antenna

针对图 5 所示平面阵列天线,设来波方向为  $(\theta_0, \varphi_0)$ ,该方向阵列  $(i, k)$  阵元的延迟为

$$\delta_{ik}(\theta_0, \varphi_0) = (id_x \sin\theta_0 \cos\varphi_0 + kd_y \sin\theta_0 \sin\varphi_0) \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

式中:  $d_x$  为阵元在  $x$  方向的间距;  $d_y$  为阵元在  $y$  方向的间距。

阵列方向图  $F(\theta, \varphi)$  为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{i=0}^3 \sum_{k=0}^1 \omega_{ik} \exp(j\omega_{\delta_{ik}}) \cdot \exp(-j\delta_{ik}(\theta, \varphi)) \quad (2)$$

式中:  $\omega_{ik}$  为  $(i, k)$  阵元的幅度加权系数;  $\omega_{\delta_{ik}}$  为  $(i, k)$  阵元的相位调节系数;  $\delta_{ik}(\theta, \varphi)$  为  $(\theta, \varphi)$  方向电磁波的对  $(i, k)$  阵元的相位延迟。

通过调节幅度加权系数和相位调节系数,使得  $\omega_{\delta_{ik}} = -\delta_{ik}(\theta_0, \varphi_0)$ ,方向图在  $(\theta_0, \varphi_0)$  方向无虚数部

分,幅值能达到最大<sup>[14-15]</sup>。

DBF 技术是通过调整各阵元的幅度加权系数和相位调节系数,在基带上采用 FPGA 来完成对各阵元多信号的加权,分为接收和发射两部分。

DBF 接收把数字波束的天线响应当作一个空间滤波器,目标来波方向为  $(\theta_i, \varphi_i)$  时,调节相位系数使  $\omega_{\delta_{ik}} = -(id_x \sin\theta_i \cos\varphi_i + kd_y \sin\theta_i \sin\varphi_i) \frac{2\pi}{\lambda}$ ,在目标方向  $(\theta_i, \varphi_i)$  的信号天线接收增益变为最大值。使用多组相位调节系数,则可以获得多个方向的增益最大方向图。接收目标波束合成如图 6 所示。

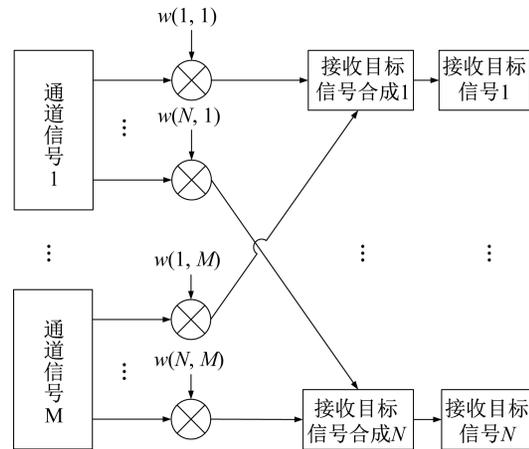


图 6 接收目标波束合成

Fig.6 Receiver beam forming

通道 1 ~ M 对应阵元或通道,1 ~ N 对应多个波束方向,通过权重实现对多个方向的信号接收,如图 7 所示。在 FPGA 内对  $N$  份  $M$  通道的数据进行分别加成,在数字部分实现空间滤波。

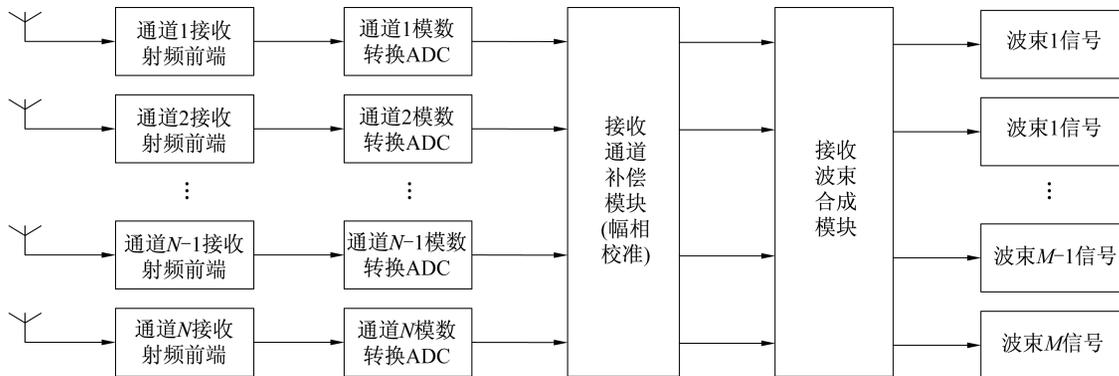


图 7 接收波束合成框图

Fig.7 Block diagram of receiver beam forming

数字波束合成发射则是在通道内复合了多个方向上的信号,通过发射功率(阵列方向图)在空间

上的不同分布,实现多个波束发射,其组成与接收框图基本相反,如图 8 所示。

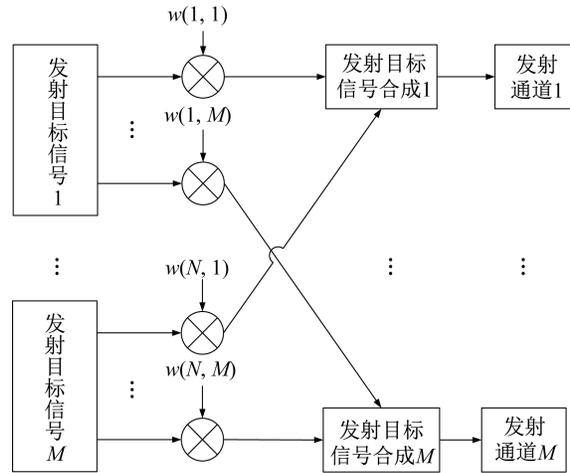


图 8 发射波束合成框图

Fig.8 Block diagram of transceiver beam forming

区别于多个波束接收,发射波束合成基于通道进行合成,而其相位调节系数与 DBF 接收相同。发射数字波束幅度调节系数采用等幅分布,可有助波束旁瓣的抑制。

由不同方向的不同相位延迟实现空间滤波,每个通道输出的信号为

$$T_M = A \cdot w_{AM} + B \cdot w_{BM} + C \cdot w_{CM} + D \cdot w_{DM} \quad (3)$$

式中:  $T_M$  为通道发出信号;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为目标波束发送的信号,以 4 个波束 4 个通道为例,  $M=1\sim 4$ 。

在目标  $(\theta_i, \varphi_i)$  方向接收到的信号为

$$\begin{aligned} R_i = & T_1 e^{-j\omega t - \delta_1} + T_2 e^{-j\omega t - \delta_2} + \\ & T_3 e^{-j\omega t - \delta_3} + T_4 e^{-j\omega t - \delta_4} = \\ & (A \cdot w_{A1} + B \cdot w_{B1} + \\ & C \cdot w_{C1} + D \cdot w_{D1}) e^{-j\omega t - \delta_1} + \\ & (A \cdot w_{A2} + B \cdot w_{B2} + \\ & C \cdot w_{C2} + D \cdot w_{D2}) e^{-j\omega t - \delta_2} + \\ & (A \cdot w_{A3} + B \cdot w_{B3} + \\ & C \cdot w_{C3} + D \cdot w_{D3}) e^{-j\omega t - \delta_3} + \\ & (A \cdot w_{A4} + B \cdot w_{B4} + \\ & C \cdot w_{C4} + D \cdot w_{D4}) e^{-j\omega t - \delta_4} = \\ & A \cdot (w_{A1} \cdot e^{-\delta_1} + w_{A2} \cdot e^{-\delta_2} + \\ & w_{A3} \cdot e^{-\delta_3} + w_{A4} \cdot e^{-\delta_4}) \cdot e^{-j\omega t} + \\ & B \cdot (w_{B1} \cdot e^{-\delta_1} + w_{B2} \cdot e^{-\delta_2} + \\ & w_{B3} \cdot e^{-\delta_3} + w_{B4} \cdot e^{-\delta_4}) \cdot e^{-j\omega t} + \\ & C \cdot (w_{C1} \cdot e^{-\delta_1} + w_{C2} \cdot e^{-\delta_2} + \\ & w_{C3} \cdot e^{-\delta_3} + w_{C4} \cdot e^{-\delta_4}) \cdot e^{-j\omega t} + \\ & D \cdot (w_{D1} \cdot e^{-\delta_1} + w_{D2} \cdot e^{-\delta_2} + \\ & w_{D3} \cdot e^{-\delta_3} + w_{D4} \cdot e^{-\delta_4}) \cdot e^{-j\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $A \cdot (w_{A1} \cdot e^{-\delta_1} + w_{A2} \cdot e^{-\delta_2} + w_{A3} \cdot e^{-\delta_3} + w_{A4} \cdot e^{-\delta_4}) \cdot e^{-j\omega t}$  为  $A$  波束的方向图增益。

若目标  $(\theta_i, \varphi_i)$  在  $A$  波束主瓣内、其他波束主瓣外,则目标能收到  $A$  的信号,其他波束信号在目标位置,相位相消抑制,处于旁瓣状态。

本方案目前所设计阵元数较少,副瓣电平较高,可对平面阵列进行经典的契比雪夫窗幅度综合,选择契比雪夫窗系数,确保旁瓣抑制大于 25 dBc。

基于  $w_{dik} = -\delta_{ik}$  的相位和契比雪夫窗系数作为复权重系数,设置目标角度为  $A(45^\circ, 37^\circ)$ 、 $B(30^\circ, 65^\circ)$ 、 $C(30^\circ, 115^\circ)$ 、 $D(45^\circ, 143^\circ)$ 、 $E(45^\circ, 217^\circ)$ 、 $F(30^\circ, 245^\circ)$ 、 $G(30^\circ, 295^\circ)$ 、 $H(45^\circ, 323^\circ)$ , 得到 8 组权重序列,通过模拟半球面角度进行扫描,计算阵列响应,根据给定的天线单元方向图,得到各波束独立的方向图,如图 9 所示。

由于天线采用对称方式进行布局,8 波束实际由两组波束参数通过旋转对称获得,单阵元增益采用高斯分布进行近似,各通道仿真(增益、波束宽度)结果见表 2。

卫星轨道高度 600 km,存在地面投影拉伸以及地球曲面效应,经过波束合成后,8 波束覆盖区域如图 10 所示,与图 4 结果基本一致。

为提高系统可靠度,针对通道故障可进行 DBF 在轨重设计。星上部分通道单元存在故障的情况下,通过软件上注或者指令上注,将 DBF 重新进行设计或仅更改通道权重系数,最大限度保持系统通信能力。若部分通道出现故障,首先判别失效通

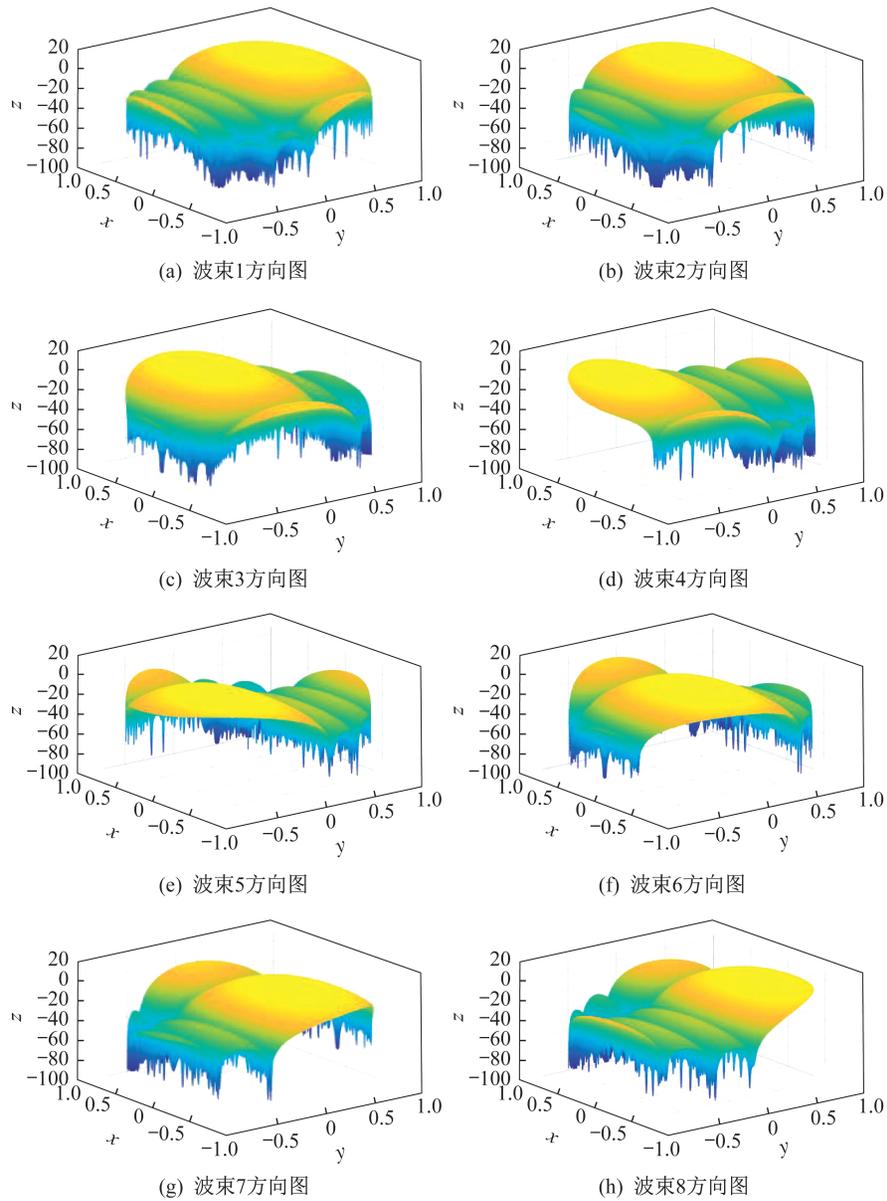


图9 8个波束独立方向图

Fig.9 Forming patterns of 8 beams

表2 各通道仿真结果

Tab.2 Simulation results of all channels

指标	波束 A	波束 B	波束 C	波束 D	波束 E	波束 F	波束 G	波束 H
增益/dB	6.77	7.79	7.79	6.77	6.77	7.79	7.79	6.77
半功率波束宽度 $x/(\circ)$	28.4	29.7	29.7	28.4	28.4	29.7	29.7	28.4
半功率波束宽度 $y/(\circ)$	46.2	47.7	47.7	46.2	46.2	47.7	47.7	46.2

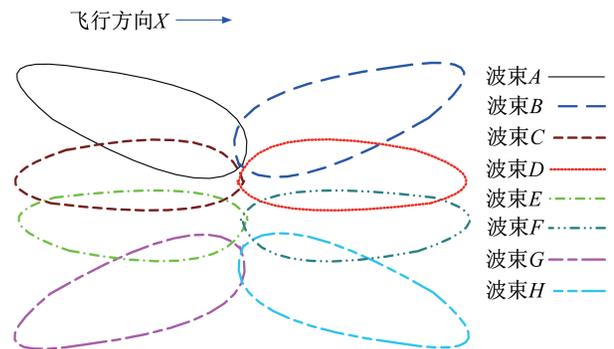


图10 波束覆盖区域(考虑地球曲率)

Fig.10 Transceiver beam forming (reckon with the curvature of the Earth)

道,将故障通道修改置零,然后重新调整各阵元的幅度加权系数和相位调节系数。

故障通道修改置零后会影响到波束合成效果,仿真结果表明:1个通道故障情况下,通过对DBF重新进行软件设计,波束增益略有下降,不会影响分系统性能指标;2个通道故障情况下,若为两个外侧通道故障,整体波束增益下降少于2 dB,若为1个外侧和1个内侧通道故障,中间4个波束增益下降小于1 dB;3个通道故障情况下,中间4个波束增益下降小于1 dB,其余情况下波束中心增益下降超过4 dB;4个通道故障情况下,所有波束增益下降均超过5 dB。

## 5 结束语

VDES系统将成为未来海事通信领域最重要的手段,并对未来水上信息服务产生深远影响,有着极为广阔的应用前景。我国作为国际海事A类理事国之一,相比欧美等国在VDES领域起步较晚,目前国内很多单位正积极开展VDES系统研究和建设,全力把握海事移动通信系统中出现的新机遇,努力使我国在VDES领域保持国际先进水平。

本文详细介绍了VDES产生背景、重要作用以及应用中存在的技术难点。为解决收发干扰问题,提出一种全双工射频解决方案,通过频分复用将收发频率间距尽量拉宽,利用窄带滤波器可极大降低发射机对接收机影响。

结合某星载研制任务(预计2021年下半年发射),针对600 km高度轨道设计了8路射频通道和8个波束方案,首次应用星载薄膜天线,通过DBF设计,整体波束覆盖范围较广,其次将大范围通信划分成多个小的独立区域,可有效缩小单个天线波束的视场覆盖范围,有利于减少AIS信号时隙冲突。仿真结果表明,在部分通道故障情况下,通过地面软件上注对DBF进行重新设计,能极大提高系统可靠度。薄膜天线具有极佳的收纳比,本文所介绍的设计方法可用于更多数量(64通道和波束以上)的应用,随着VDES系统不断推广和在轨使用,有着广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 张涛.E-NAVIGATION框架下新一代AIS研究[D].大连:大连海事大学,2016.
- [2] 熊雅颖.海事通信技术新进展:VDES系统[J].卫星应用,2016,4(2):35-40.
- [3] 陈亮,金永兴,汤可成,等.海上甚高频宽带数据传输技术研究[J].计算机工程与科学,2016,38(10):2065-2069.
- [4] ERIKSSON O F.VDES-VHF data exchange system overview [EB/OL].(2014-01-20) [2020-06-02].[https://blog.canpan.info/oprf\\_en/img/VDES-Data20Exchange20System20Overview.pdf](https://blog.canpan.info/oprf_en/img/VDES-Data20Exchange20System20Overview.pdf).
- [5] 樊霞,卢道琦,张兴来.浅析甚高频数据交换系统[J].数字通信世界,2016(11):2.
- [6] BERREVOETS M.Aids to navigation knowledge and innovations from the Torre de Hercules to e-Navigation and beyond [EB/OL].(2014-05-25) [2020-06-02].<http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/18th%20IALA%20Conference%202014%20report%20v1.pdf>.
- [7] ZACHARIAE FRANCIS.G1139: the technical specification of VDES [EB/OL].(2014-01-20) [2020-06-02].[http://ftp.e-navigation.nl/sites/default/files/1139-ed.3-the-technical-specification-of-vdes\\_june-2019.pdf](http://ftp.e-navigation.nl/sites/default/files/1139-ed.3-the-technical-specification-of-vdes_june-2019.pdf).
- [8] JONAS M.World Radio Communication Conference (WRC-15) provisional final acts [EB/OL].(2019-10-28) [2020-06-02].[https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.13-2019-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.13-2019-PDF-E.pdf).
- [9] 赵梦迪.基于VDES的解调系统的研究与实现[D].北京:北京邮电大学,2018.
- [10] 魏文武.VDE-SAT上下行链路信道估计的研究与仿真[D].北京:北京邮电大学,2017.
- [11] 吴思利,王辉,郑世超,等.Ka数字波束合成-合成孔径雷达顺轨干涉性能分析[J].上海航天(中英文),2021,38(1):72-79.
- [12] 戴宇航,蒋松,陈金宝,等.大型星载天线桁架式可折叠机构的模态分析[J].上海航天,2019,36(1):96-100.
- [13] 赵红梅.星载数字多波束相控阵天线若干关键技术研究[D].南京:南京理工大学,2009.
- [14] 朱丽.星载多波束天线校正技术研究[D].上海:上海微系统与信息技术研究所,2007.
- [15] 王军.雷达手册[M].北京:电子工业出版社,2007:250-254.