

基于混合波束赋形的低轨通信卫星相控阵天线架构研究

胡 荣¹, 李秀梅², 邓 娟³, 周 骏³, 董姝婧³, 刘 玲³, 马文英³

(1.成都铱通科技有限公司, 四川 成都 610095 ;

2.中国电子科技集团有限公司第十研究所, 四川 成都 610036 ;

3.成都信息工程大学通信工程学院(微电子学院), 四川 成都 610225)

摘 要: 针对低轨通信卫星系统低损耗、低时延和高指向精度等特点, 基于对混合波束赋形技术原理与优势的分析, 研究一种适用于低轨通信卫星系统的混合波束赋形架构——“模拟波束赋形网络+数字波束赋形网络”, 采用多通道射频前端芯片、混频芯片及数字波束赋形专用芯片(ASIC), 与瓦片式相控阵天线阵列高度集成, 在满足可扩展/拼接阵面的基础上, 实现性能、成本、复杂性和功耗等因素的综合优化, 为我国实现天基物联和可重构相控阵天线系统提供参考。

关键词: 天基物联; 可重构相控阵天线; 混合波束赋形; 芯片集成; 瓦片式

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021025

Research on the Architecture of Phased Array Antenna of LEO Communication Satellites Based on Hybrid Beamforming

HU Rong¹, LI Xiumei², DENG Juan³, ZHOU Jun³, DONG Shujing³, LIU Ling³, MA Wenying³

1.Iridium Communications Co., Ltd., Chengdu 610095, China

2.The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China

3. School of Communication Engineering and Microelectronics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

Abstract: Due to the characteristics of low earth orbit (LEO) communication satellite system like low propagation loss, small propagation delay and high pointing accuracy, a hybrid architecture—“analog beamforming stage and digital beamforming (DBF) stage” was proposed, and the principle and advantages of hybrid beamforming were analyzed. Through three dimensional integrating of multi-channel RF front-end chips, mixers, dedicated DBF ASIC chips, and tiles phased array antenna arrays, the proposed hybrid beamforming could be expanded or spliced. This hybrid architecture achieved the optimization of performance, cost, complexity and power consumption, and provided a reference for China to build space based internet of things system and reconfigurable phased array antenna system in the future.

Keywords: space based internet of things, reconfigurable phased array antenna, hybrid beamforming, chip assembly, tiles

1 引言

近年来, 随着5G移动通信系统的全面商用以及6G通信概念的提出, 世界逐步进入一个万物互联的时代。作为移动通信系统构建的地基物联网的有效补充, 基于卫星通信网络构建的天基物联网可助力实现全球无缝覆盖的物联网体系^[1]。低轨通信卫星具有空间传输损耗低、传输时延小、研制周期短、卫星终端小和可批量化生产等显著优势^[2-4],

是近年来卫星通信领域的研发重点。

相控阵天线系统是保证低轨通信卫星高质量通信的有效方式。低轨通信卫星相对地面做高速运动, 要求所有地面站天线都必须具备类似“动中通”的跟踪指向能力, 能够有效跟踪卫星方位并将信号准确传输, 避免由对星精度差、容易丢星而导致的通信中断、通信时延等问题^[5]。同时, 低轨通信卫星使用寿命相对较短, 每过3~7年就需要

收稿日期: 2021-02-05; 修回日期: 2021-04-01

通信作者: 马文英, mwy@cuit.edu.cn

基金项目: 四川省科技厅科技计划项目(No.18SYXHZ0076)

Foundation Item: Science and Technology Project of Sichuan Province (No.18SYXHZ0076)

重新发射,这就要求天线系统具有可拼接可重构的能力,以便实现对任意卫星的通用性。要想进一步提升相控阵天线的综合性能,关键在于优化卫星系统中相控阵天线的性能、体积、功耗以及成本等因素^[6]。在保证性能不降低的前提下,实现相控阵天线多波束赋形系统的轻量化、低功耗、低成本是一条必由之路^[7]。针对上述问题,迫切需要研发和实现多波束有源相控阵天线的波束赋形架构。

波束赋形实际上是改变天线单元收发信号的相位幅度,产生具有指向性的波束,再进行叠加或抵消。按照波束赋形方式,相控阵天线通常采用模拟波束赋形和数字波束赋形(Digital Beam Forming, DBF)两种方式。模拟波束赋形技术主要通过衰减器、移相器调整幅度和相位,通过功分合成网络实现对波束信号的合成与分配。模拟波束赋形网络是固定的,无法实时改变波束数量与天线极化方式。仅包含单个射频链的模拟波束赋形架构不能提供高阶空间复用增益,可实现波束少,可扩展性较差,很难进行功能复用、阵面拼接^[8-9]。因此,尽管模拟波束赋形架构是最经济的波束赋形方式,但其不适用于低轨通信卫星系统多目标追踪与高精度指向的需求^[10]。与模拟波束赋形相比,数字波束赋形架构具有高可靠、可扩展、智能化的特点。2001年欧洲的Artemis卫星证实,在等效质量基本相同的情况下采用数字波束赋形技术产生的波束数量是采用模拟波束赋形的两倍^[11]。全数字架构提供了最佳的性能和灵活性^[12],但却存在设备复杂、功耗大、成本高、散热难、大规模天线阵面工程化实现困难等问题。模拟与数字波束赋形技术的不足之处,凸显了对兼顾性能、功能与成本的第3种波束赋形架构即混合波束赋形技术的需求。

近年来,国外一些研究机构开始研究混合波束赋形技术,并逐步投入实际应用中^[13-17]。2010年ZAGHLOUL等^[18]提出了一种一维线性扫描的混合波束赋形器,该赋形器由有限扫描的天线阵和控制不同信道波束合成的数

字处理部分构成。由于所使用的模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)数量比纯数字波束赋形器少,因而功耗较低。YOON等^[17]在2015年提出一种混合波束赋形的相控阵架构,旨在为多用户提供数字波束赋形子阵单元或为特定用户提供多个窄波束的赋形方案。然而,该结构仍处于理论仿真阶段,相控阵天线的等效全向辐射功率等指标并不理想。现阶段,国内针对混合波束赋形架构的研究偏少,仍待完善。本文基于混合波束赋形的原理,提出了一种基于模拟波束赋形网络和数字波束赋形网络的两级赋形架构,并给出了多芯片三维集成的系统实现方式。

2 混合波束赋形原理与架构

2.1 混合波束赋形原理

图1为模拟、数字、混合3种波束赋形方式原理架构。混合波束赋形技术即模拟赋形和数字赋形结合在一起,将原本的数字波束赋形分割成两部分:一部分由低维的数字波束赋形实现;另一部分由高维的模拟波束赋形实现,其架构如图1(c)所示。这大大降低了射频链路与数字链路之间对数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)和模数转换器的需求。

在接收端,相控阵天线(N 单元)接收到的射频信号通过衰减器和移相器调整幅度相位,并在功分合成网络中实现波束的合成。多路(M 路)信号通过模拟波束合成为一路信号,经下变频后形成中频信号(N/M 路),然后数据流在中频基带中通过数字预编码矩阵进行数字波束处理。

在发射端,数字信号经过DAC转换成多路(N/M 路)模拟信号,经上变频后,通过分路器进入多路(M 路)模拟预编码矩阵实现模拟波束赋形。

射频前端电路可以在发射机中提供足够的信号幅度增益和线性传输功率,并在接收机中提供低噪声系数。通过将功率引导至具有窄波束的目标用户,可以复用相

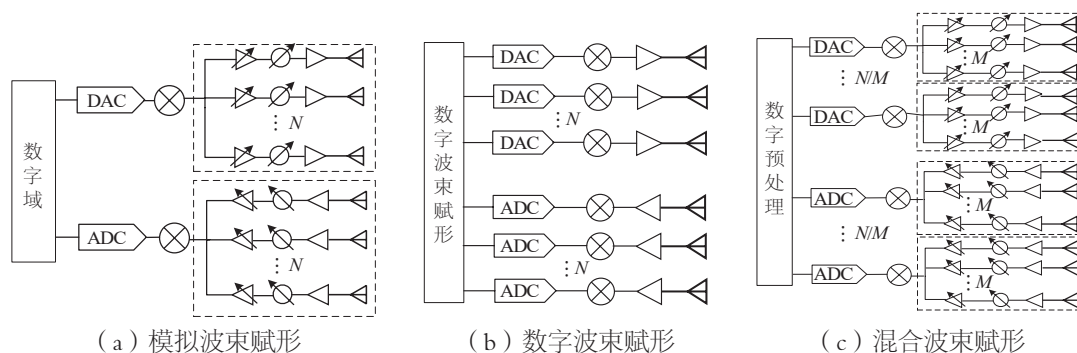


图1 3种波束赋形原理架构

同的频谱，同时在指定时隙中为多个用户服务。可见，混合波束实质上是将数字预编码和模拟波束赋形两者结合，在一个空间中同时产生多个波束（空间复用）^[19]。

由 N 个天线单元组成的收发天线阵面，采用模拟、数字、混合3种波束赋形方式，射频到数字链路所需器件数量及功耗对比见表1。其中 M 和 N 满足： $N>M$ ， $N>L$ ， $M>1$ ， $L>1$ 。

表1 不同波束合成方式 N 单元接收天线阵面器件数量及功耗对比（1）

器件	器件典型功耗/mW	器件数量/个		
		模拟合成	数字合成	混合合成
低噪声放大器	30	N	N	N
可变增益放大器	10	N	0	N
移相器	5	N	0	N
N 合1合成器 (M 合1合成器)	0	1	0	N/M
混频器	10	1	N	N/M
模数转换器	20	1	N	N/M
数字波束合成器 (L 个通道)	70	0	N/L	$N/M/L$

根据表1，可计算出相同阵面规模下，3种波束合成方式的功耗。模拟合成方式总功耗为 $(45N+30)$ mW，数字合成方式总功耗为 $(60N+70N/L)$ mW，混合合成方式总功耗为 $(35N+30N/M+70N/M/L)$ mW。通过对比计算可知，模拟合成方式功耗和成本最小，数字合成方式功耗和成本最大，混合合成方式功耗居中。随着天线单元 N 的增大，数字合成方式功耗显著增加，而混合合成方式可以合理选择 M 与 L 的值，使得功耗不至于过快增长。对于相同规模的发射天线阵面，通过表2同样可计算得出与表1相同的结论。

表2 不同波束合成方式 N 单元发射天线阵面器件数量及功耗对比（2）

器件	器件典型功耗/mW	器件数量/个		
		模拟合成	数字合成	混合合成
数字波束分配器 (L 个通道)	70	0	N/L	$N/M/L$
数模转换器	20	1	N	N/M
混频器	10	1	N	N/M
1分 N 功分器 (1分 M 功分器)	0	1	0	N/M
移相器	5	N	0	N
可变增益放大器	10	N	0	N
功率放大器	130	N	N	N

基于上述分析可以看出，混合波束赋形基带处理的通道数目明显小于模拟天线单元的数量，复杂度大幅下降，

成本降低，系统性能接近全数字波束赋形，非常适用于低轨卫星通信系统。这种方法十分契合毫米波通信的特性，使得在毫米波范围内使用大规模天线阵列传输多个数据流变得可行，可以合理实现模拟电路复杂性和数据速率^[19]。

2.2 混合波束赋形的特点分析

混合波束赋形的特点主要是通过与传统的全模拟波束赋形和现代数字波束赋形对比得到的。传统的全模拟波束赋形的特点是基带处理的通道数量远小于天线单元的数量，因此容量受到限制，并且天线的赋形完全是靠硬件搭建的，还会受到器件精度的影响，使性能受到一定的制约。模拟波束相控阵天线可处理数据率低，难实现多波束能力，波束指向性及多目标追踪能力差，适用于追踪目标单一或追踪要求较低的应用系统。全数字波束赋形每个天线需要配置一套独立的射频链路，包括造价昂贵的数模/模数转换器等，带来了高额的功耗和硬件开支；在实际应用中面临着复杂度高、功耗大、散热及布阵困难等问题，随着大规模系统天线单元数量和孔径尺寸的大幅增加，其工作性能得到提升的同时会导致成本的倍增。这些限制较大幅度地影响了数字波束赋形技术的广泛应用，导致其仅适用于追求极高性能的系统。

混合波束赋形架构兼具数字波束赋形的高性能、可扩展性和全模拟波束赋形的低功耗等特点。混合波束赋形系统可以将瓦片式天线阵面和多功能集成芯片通过高密度互连印制板集成于一体，集成度高，可以有效降低有源相控阵天线成本。在天线单元数量越多、阵面越大时，其功耗及成本的优势相比数字波束赋形而言就越明显。混合波束赋形架构使用多个射频链路实现空间多路复用，每个链路的模拟处理可实现一定的波束赋形增益^[20]，达到了模拟波束赋形的小体积和低功耗。混合波束赋形能够取得的频谱效率与天线部署方式、阵元数量以及射频链路数有关，特定场景下的最优射频链路数与系统应用相关^[21]。

3种波束赋形方式对比见表3。

表3 3种波束赋形方式对比

波束赋形方式	性能	成本	体积	工艺复杂度	可扩展性	射频损耗
全模拟	性能低、功耗低	低廉	小	简单	难	高
全数字	性能高、功耗高	昂贵	大	复杂	易	低
混合波束	性能高、功耗较低	适中	适中	适中	易	低

综上所述，模拟波束赋形方式成本和功耗最优，而数字波束赋形方式功能和性能更强。实际应用中，综合

成本、功耗、功能和性能因素考虑,混合波束赋形技术是一种更优的多波束赋形方式。

2.3 混合波束赋形架构

图2以接收通道为例,给出了混合波束赋形的实现架构。该架构采用“两级”波束赋形网络,即模拟波束赋形网络和数字波束赋形网络。在模拟波束赋形网络中,相控阵天线射频连接方式采用子阵结构。 M 个接收链路构成单个移相处理单元, K 个移相处理单元经过功分合成网络构成下一级数字波束赋形网络的天线子阵,形成一个更具方向性的“超级单元”。 N 个天线子阵对应 N 个数字通道,经过模数转换后的数字信号与来自其他超级单元的信号相干组合,在性能和复杂性之间达到最优化,实现了数字波束赋形的性能目标。

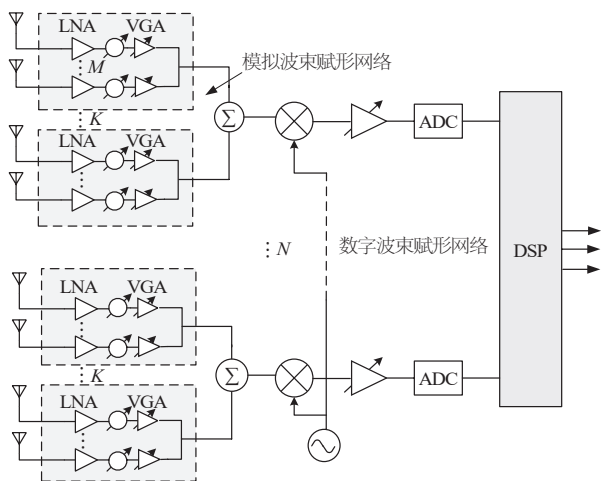


图2 混合波束赋形实现架构（接收通路）

模拟波束赋形网络中,每个接收链路主要由低噪声放大器（Low Noise Amplifier, LNA）、移相器、衰减器、可变增益放大器（Variable Gain Amplifier, VGA）等构成,实现对射频接收信号的低噪声放大/衰减和移相。 M 个通道信号在移相处理单元完成第一次合路输出; K 个移相处

理单元经功分合成网络完成第二次合路,完成模拟波束赋形。变频器对功分合成网络输出的波束合成信号进行下变频至中频。ADC用于将中频信号转化为数字信号,以便进入数字波束赋形网络进行信号处理。数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）用于整个阵面接收的多通道信号数据的快速处理与波束控制。发射通路与接收通路硬件结构大致相同,信号流方向相反,这里不再赘述。

3 混合波束赋形系统实现

混合波束赋形可按照如图3所示的方案实现。由于射频接收芯片中接收链路的通道数（ M 路）有限,为实现灵活数量的天线子阵,模拟波束赋形网络由多个射频芯片构成（ K 个）,经过片内功分器和片外功分合成网络实现对 $K \times M$ 单元模拟天线子阵的信号接收。 N 个天线子阵通过功分合成网络,由 N 片混频芯片组进行变频获得中频信号,进入DBF专用芯片中进行数字波束赋形。和模拟波束赋形相比,由于采用了 N 个天线子阵,波束方向的可控制性和灵活性大大增加。和数字波束赋形相比,所使用的混频芯片及ADC/DAC芯片的数目将会大大降低,提高了系统集成度,降低了成本。

3.1 多通道射频前端芯片

卫星通信中,信号以不同的频率和极化方式在卫星和地面站之间传输。射频前端对模拟波束赋形性能起到关键性作用,一定程度上决定了系统的输入输出性能。天线接收端采用多通道射频前端芯片,目的是将天线单元耦合下来的信号完整（不失真）地提取出来。具体来讲,射频前端对射频信号进行线性放大,在波束控制器控制下对波束进行移相和衰减,防止带外功率较大的信号进入后续电路,避免信号干扰消耗混频器的动态范围,减少到达混频芯片的噪声。

多通道射频前端芯片基于半导体工艺（锗硅、CMOS等）设计。低轨通信卫星通信多采用毫米波频段（如Ka频段），毫米波隔离技术在芯片设计中需要重点

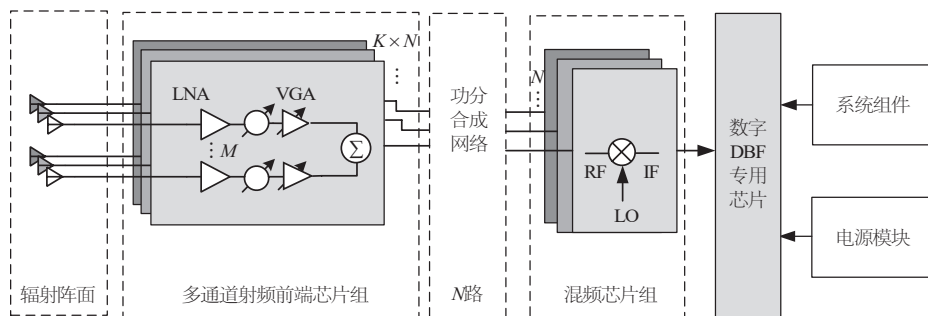


图3 混合波束赋形系统实现框图（接收通路）

考虑。图4给出了八通道射频前端芯片系统框图,包括发射链路和接收链路。为实现高隔离度和更好的系统指标,系统采用收发分离式架构,接收链路和发射链路具有独立的相位控制单元、幅度控制单元和放大单元。通道中的移相器、衰减器等均为无源结构,对信号有一定程度的衰减,因此可以在链路中根据指标要求灵活地插入增益补偿放大器,使信号在传输过程中不会有大幅度衰减。采用高增益、低噪声系数的低噪声放大器进行信号放大和降低系统的整体噪声系数,并尽量靠近天线信号接收端;采用可调增益放大器实现大动态范围。各个通道可接受外部数字信号控制,实现多通道独立调幅、调相和放大。

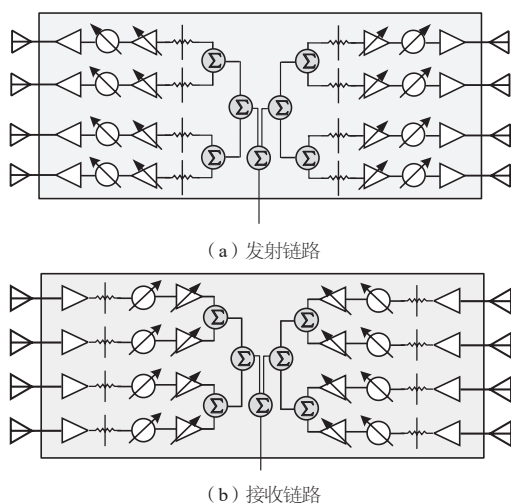


图4 八通道射频前端芯片系统框图

在芯片设计前,需要对各个单元模块进行指标分配。移相器是射频前端芯片的重要单元,往往采用数控方式对接收或发射的信号进行相位调整,主要指标包括移相位数、移相均方根(Root Mean Square, RMS)误差和移相附加衰减等。衰减器为信号幅度调节单元,往往采用数控方式对接收或发射的信号进行幅度调节,以满足后一级电路对信号幅度的要求,主要包括衰减位数、衰减RMS以及衰减附加相移等指标。根据系统指标要求,需要合理设计移相单元和衰减单元的位数,以及对增益补偿放大器的增益要求等。

收发链路设计过程中需要重点考虑的指标还有通道增益和噪声系数。通道增益主要与低噪声放大器、增益补偿放大器、驱动放大器和移相等单元电路相关,是多个单元的增益累加。噪声系数与通道内几乎所有单元电路均相关,低噪声放大器及其输入端馈线损耗是主要贡献者。除此以外,发射链路中功率放大器的线性度

(包括1 dB压缩点和三阶交调),以及功分网络的衰减特性等也是影响通道性能的重要参数。

3.2 混频芯片

功分合成网络输出的接收信号在混频芯片中进行下变频。图5以接收通道为例给出了混频器芯片的组成框图,芯片内集成了混频器、频率综合器、滤波器和中频放大器等单元电路。频率综合器为混频器提供输入参考源,包括压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)和锁相环路。锁相环路包括鉴频鉴相器、电荷泵、分频器、预分频器、 $\Delta-\Sigma$ 调制器等,实现对VCO频率和相位的锁定,从而产生稳定的频率输出。射频前端芯片组输出的信号经功分合成网络进行功率合成后,进入混频芯片,与VCO输出的本振信号进入混频器进行混频,得到中频信号,经过带通滤波器滤除带外杂散信号,经中频放大器放大后获得中频输出,为下一级数字波束赋形网络提供符合要求的中频信号。

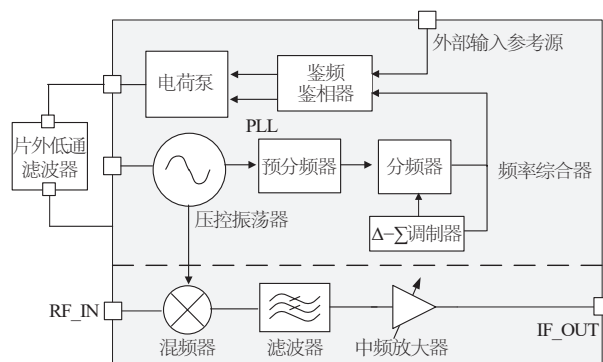


图5 混频器芯片组成框图(接收通路)

混频时涉及输入输出信号的幅相一致性,包括相同幅值的信号同时输入 K 路接收(发射)链路时输出端的信号幅值的一致性,以及相同相位的信号同时输入 K 路接收(发射)链路时输出端信号相位的一致性。信号线走线不合理、本振设计不合理、芯片工作非线性等设计缺陷都会导致幅相不一致。混频器芯片组可通过共用相同本振来保证混频器芯片输入输出幅相一致。

3.3 数字波束赋形芯片

数字波束赋形芯片中,在接收链路,ADC采样经过混频模块的合路信号,进行数字下变频,在数字域进行波束赋形,而后进入DSP进行数据处理。在发射链路,控制系统或DSP产生的系统同步信号和脉冲宽度信号经数字线性调频形成数字中频信号,经DAC转换,输送给混频模块。目前,我国大规模数字波束赋形专用芯片设

计和开发能力还比较薄弱^[22]。

数字DBF芯片组成结构如图6所示,包括波束收发控制模块、接收通道数字波束赋形和发射通道数字波束赋形3个部分。DBF芯片在每个接收或发射元件上使用数字信号处理技术,以形成所需的时延、相移、幅度和频率响应,从而优化天线性能并补偿每个元件射频链的过度变化。

波束收发控制主要用于配置射频前端芯片、混频芯片、数字接收通道和数字发射通道的工作参数、波束扫描控制和收发切换以及数字DBF芯片间通信等。这些控制信息是软件定义的,由CPU解读和执行,携带波束管理或各种维护命令。控制器支持发送和接收两种类型的控制消息。并行转换器子系统识别在何时接收到这些消息,如果它们不针对当前的DBF芯片,则将它们转发到多芯片系统中的下一个DBF芯片。如果控制消息针对当前的DBF芯片,则该消息存储在片内控制消息队列中,以便片上控制器的读取。

在接收通道,包括ADC高速采样模块、数字下变频模块、波束形成模块和数据传输与转换模块。从混频芯片输出的中频信号经过模数采样,将模拟信号转化为数字信号后进行下变频处理。宽脉冲和窄脉冲通过乘法器与不同的载波信号进行混频,获得I/Q解调信号,然后通过低通滤波和信号抽取,将中频信号搬到基带。波束形成模块将多路基带数据通过加权、求和/差等DBF算法进行波束赋形,得到和差波束的I/Q数据。数据传输与转换模块将包含宽脉冲和窄脉冲的和差通道基带I/Q数据放进随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)缓冲,然后进行高速数据转换,以便输出到片外下一级DSP信号处理器。

在发射通道,包括数据传输与转换模块、信号波形产生模块和高速DAC转换模块。由外部信号处理器发来的数据信号经数据转换、存储和处理后产生脉冲宽度、重复周期、信号调制带宽等信号,进入信号波形产生模块。系统同步信号和脉冲宽度控制信号等通过直接数字频率合成(Direct Digital Frequency Synthesis, DDS)线性调频,获得相应的中频信号。该数字中频信号经过DAC可得到多路模拟信号输出,用于给混频器芯片阵列提供中频信号输入。

综上所述,一个DBF芯片可以处理来自 N 个混频器芯片组的中频信号,因此可以支持包含 $N \times K \times M$ 个单元的天线阵。然而,当天线阵单元数较大时,由于芯片集成度有限,单个数字DBF芯片可能无法完成对所有单元的数字波束赋形任务。这就要求DBF芯片具备可扩展性,多个DBF芯片可以通过高速数据连接进行级联,实现可拼接构架,以创建单个DBF芯片无法支持的更大单元数的相控阵天线。

在多DBF芯片的系统中,波束赋形功能分布在DBF芯片之间——每个芯片中的波束赋形子系统只能同时接收或同时发送本地波束,然后形成组合波束。在接收端,每个本地波束被延迟,以便可以与来自前一个DBF芯片的本地波束连续相加。产生的波束被传递到下一个DBF芯片,与其本地波束相加,以此类推。在发射端,来自前一个DBF芯片的波束在每个DBF内被分离,它会立即被传递到下一个DBF,并在发送到波束赋形器生成本地波束之前被延迟。延迟应考虑波束赋形参数(如天线几何形状),以及整个主链的处理时延。由此产生的时延分为整数采样时延和相位补偿时延,即时延 $=N \times$

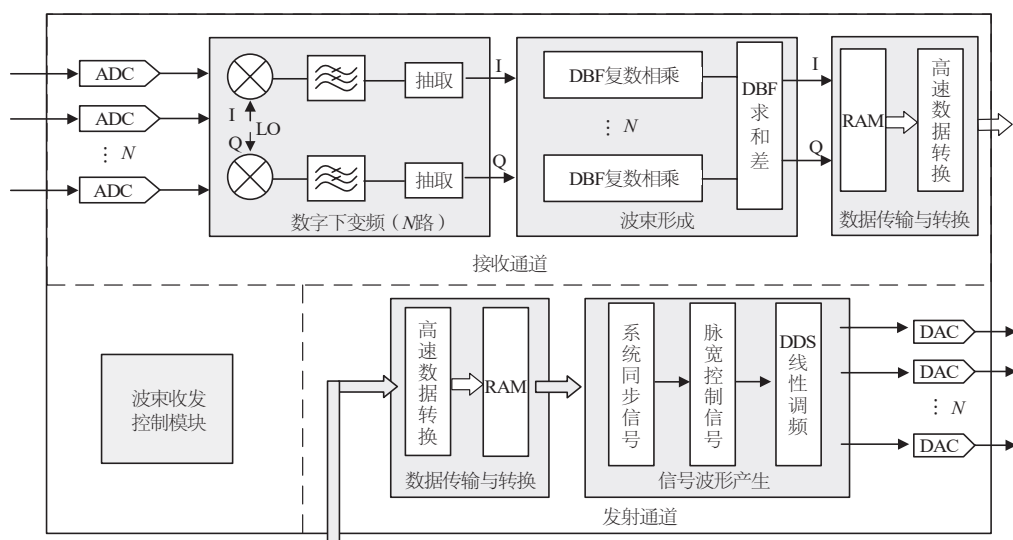


图6 数字DBF芯片组成结构

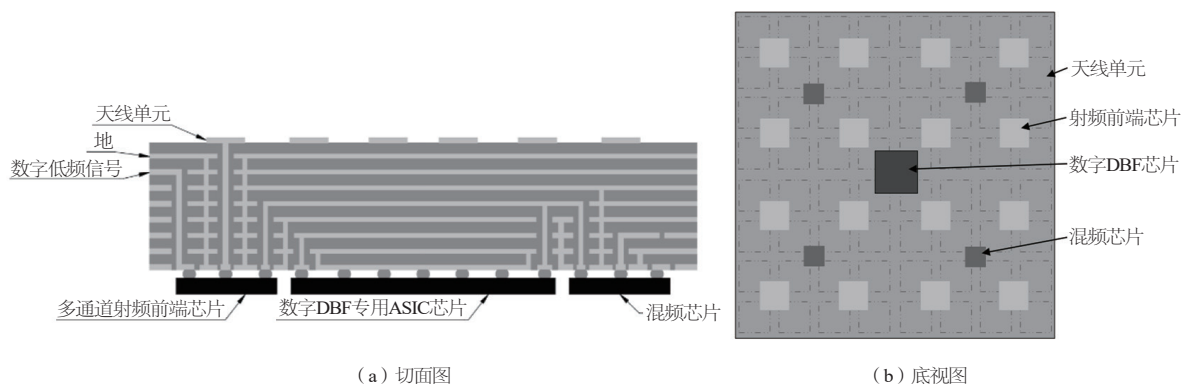


图7 实现混合波束天线的一种3D叠层结构 (以 8×8 单元为例)

样时延+相位补偿时延,其中相位补偿时延是小于单个采样时延的剩余部分。

3.4 混合波束赋形天线的三维集成

在天线与电路系统集成设计中,基于高密度互连印制板工艺和多通道芯片集成技术,将天线单元、多通道射频前端芯片、混频芯片、数字DBF芯片等全部集成到一块印制板上,同时采用盲埋孔、SMT回流焊等方式实现电气互连,结构紧凑轻薄,最大限度地压缩了垂直方向上的空间,装配简单,生产成本低廉。

图7为实现混合波束天线的一种3D叠层结构(以 8×8 单元为例),瓦片式架构大幅降低了射频板的剖面 and 体积。多通道射频前端芯片、混频芯片和数字DBF芯片位于架构的底层,天线单元位于印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)架构的顶层,通过垂直互连孔将射频信号与各个芯片相连,保证了信号传输的完整性。3类芯片间的信号经过孔在中间层完成线路转换。

4 结束语

本文所提出的混合波束赋形架构在实现数字波束赋形的高灵活性基础上,依据现有芯片技术,可以结合模拟波束赋形和数字波束赋形的优势,有效提升相控阵天线成本、功耗和性能。混合波束赋形架构还能够灵活改变波束数量以适应不同信号体制的能力,使之能在未来广泛应用于低轨通信卫星通信系统,为未来搭建全球覆盖的卫星信息网络提供了重要落脚点。

参考文献:

[1] 汪春霆,翟立君,徐晓帆.天地一体化信息网络发展与展望[J].无线电通信技术,2020,46(5):493-504.

WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospect of the integrated information network of world[J]. Radio Communication Technology, 2020, 46(5):493-504.

[2] 孙晨华,章劲松,赵伟松,等.高低轨宽带卫星通信系统特点对比分析[J].无线电通信技术,2020,46(5):505-510.

SUN C H, ZHANG J S, ZHAO W S, et al. Comparative analysis of the characteristics of broadband satellite communication systems in high and low orbits[J]. Radio Communication Technology, 2020, 46(5): 505-510.

[3] 章罗娜,马忠成,饶建兵.低轨卫星互联网发展趋势及市场展望[J].国际太空,2020,503(11):30-33.

ZHANG L N, MA Z C, RAO J B. The development trend and market outlook of LEO satellite internet[J]. International Space, 2020, 503(11):30-33.

[4] YOU L, LI K X, WANG J, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1851-1865.

[5] 肖永伟,孙晨华,赵伟松.低轨通信星座发展的思考[J].国际太空,2018(11):24-32.

XIAO Y W, SUN C H, ZHAO W S. Thoughts on the development of low orbit communication constellation[J]. Space International, 2018(11):24-32.

[6] 张光义,华海根,邵润朋.相控阵接收多波束的数字形成方法及计算机模拟实验[J].电子学报,1982(4):47-53.

ZHANG G Y, HUA H G, SHAO R P. Digital forming method and computer simulation experiment of phased array receiving multi-beam[J]. Electronic Journal, 1982(4): 47-53.

[7] 朱洪涛,郭庆.面向低轨卫星网络的动态虚拟化分布式移动性管理方法研究[J].天地一体化信息网络,2020,1(1):88-94.

ZHU H T, GUO Q. Research on dynamic virtualization distributed mobility management method for LEO satellite network[J]. Space-

- Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1):88-94.
- [8] BLANDINO S, MANGRAVITI G, DESSET C, et al. Multi-user hybrid MIMO at 60 GHz using 16-antenna transmitters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2019,66(2): 848-858.
- [9] ZHANG W, XIA X, FU Y, et al. Hybrid and full-digital beamforming in mmWave massive MIMO systems: A comparison considering low-resolution ADCs[J]. China Communications, 2019, 16(6): 91 - 102.
- [10] SHEU J S. Hybrid digital and analogue beamforming design for millimeter wave relaying systems[J]. Journal of Communications & Networks, 2017, 19(5):461-469.
- [11] 梁广, 龚文斌, 刘会杰. 可重构星载多波束相控阵天线设计与实现[J]. 电波科学学报, 2010(1): 184-189.
- LIANG G, GONG W B, LIU H J. Design and implementation of reconfigurable spaceborne multi-beam phased array antenna[J]. Journal of Radio Science, 2010(1):184-189.
- [12] ZHANG R Q, ZHOU J Y, LAN J, et al. A high precision hybrid analog and digital beamforming transceiver system for 5G millimeter-wave communication[J]. IEEE Access, 2019, 7(99): 83012-83023.
- [13] TAN M C, LI M, ABBASI Q H, et al. A flexible low-cost hybrid beamforming structure for practical beamforming applications[C]//2019 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT). Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [14] HAN S F, CHIH-LIN I, XU Z K, et al. Reference signals design for hybrid analog and digital beamforming[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1191-1193.
- [15] MORSALI A, CHAMPAGNE B. Achieving fully-digital performance by hybrid analog/digital beamforming in wide-band massive-MIMO systems[C]//ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [16] SOHRABI F, YU W. Hybrid digital and analog beamforming design for large-scale antenna arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3):501-513.
- [17] YOON H J, OH T K, LEE Y, et al. Phased array antennas and antenna interference control for hybrid adaptive beamforming[C]//The 2015 International Workshop on Antenna Technology. Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [18] ZAGHLOUL A I, KILIC O. Hybrid beam former for distributed-aperture electronically steered arrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010(9): 678-681.
- [19] EISENBEIS J, LOPEZ P R, MAHLER T, et al. Low complexity antenna array concept using overlapped subarray based hybrid beamforming[C]//2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Piscataway: IEEE Press, 2018.
- [20] SAMIMI M K, AKDENIZ M R, LIU Y P, et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1164-1179.
- [21] 徐华正, 朱诗兵, 席有猷. 毫米波大规模MIMO系统混合波束成形技术综述[J]. 电讯技术, 2019, 59(2): 121-128.
- XU H Z, ZHU S B, XI Y Y. Summary of hybrid beamforming technology for millimeter wave massive MIMO system[J]. Telecommunications Technology, 2019, 59(2):121-128.
- [22] 刘乃金, 陈东, 梁宗闯, 等. 移动通信卫星星载数字处理器件需求分析与方案设计[J]. 航天标准化, 2011(3): 13-17.
- LIU N J, CHEN D, LIANG Z C, et al. Demand analysis and scheme design of on-board digital processing devices for mobile communication satellites[J]. Aerospace Standardization, 2011(3): 13-17.

[作者简介]



胡荣（1985—），男，成都钛通科技有限公司研发部应用工程师，主要研究方向为射频与毫米波电路设计，主要从事基于硅基CMOS工艺的低成本瓦片式相控阵阵面设计工作。



李秀梅（1976—），女，硕士，中国电子科技集团公司第十研究所高级工程师，主要研究方向为天线设计，主要从事相控阵天线设计工作。



邓娟（1999—），女，成都信息工程大学硕士生，主要研究方向为通信专用集成电路与微电子系统，主要从事硅基射频前端芯片研究工作。



周骏（1997—），男，成都信息工程大学硕士生，主要研究方向为电子信息材料与射频集成器件，主要从事相控阵天线研究设计工作。

关于《天地一体化信息网络》期刊

《天地一体化信息网络》（Space-Integrated-Ground Information Networks）是由工业和信息化部主管，人民邮电出版社有限公司主办，天地一体化信息网络产业技术创新战略联盟提供学术指导，北京信通传媒有限责任公司出版的科技期刊，于2020年创刊，面向国内外公开发行。

办刊宗旨是刊载天地一体化信息网络领域具有创新性的基础理论、关键技术和典型工程应用研究成果，促进该领域学术交流，助推产业发展，服务天地一体化信息网络重大工程建设。

办刊方针是刊载天地一体化信息网络相关领域有突破性的基础理论研究、创新性的关键技术、热点问题研究、重大成果应用，以及与天地一体化信息网络相关的交叉领域的科研内容，充分展示我国在天地一体化信息网络方面的研究成果，反映天地一体化信息网络技术与工程应用的前沿水平，为天地一体化信息网络相关领域的科技创新与产业服务提供学术交流支持、工程示范指导，加快领域内专业人才的培养，促进领域发展。

主要栏目包括聚焦、专题、综述、研究、应用等。

聚焦：针对天地一体化信息网络中前沿发展和焦点问题进行归纳、分析、探讨，提出设想或指明方向。

专题：对天地一体化信息网络中的研究领域的发展研究进行专题策划，覆盖其各个关键的、具有重要进展的子领域的研究成果，邀请相关领域权威科学家作为特邀责编，进行组织策划。

综述：对天地一体化信息网络中前沿学科领域的现状进行分析归纳，探讨或借鉴相关技术领域发展，指出后续可行的发展方向。

研究：刊载具创新性、高水平 and 重要科学意义的天地一体化信息网络领域的最新科研成果，描述其科学研究过程、进展和结果，探讨科研过程中的关键技术、问题，并说明验证其成果的创新性和可行性。

应用：展示天地一体化信息网络领域中具有典型性、可大规模推广的、具有创新性思想的应用案例，阐述其设计理念，设计、应用、实施的关键手段及方法，透彻分析其应用价值，探讨其借鉴意义。

收录声明

本刊对发表的文章，拥有出版电子版、网络版版权，并拥有和其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬中已经包含上述费用。

Space-Integrated-Gound Information Networks has the copyright to publish electronic edition, online edition of the published articles, and has the right to exchange information with other sites. The expenses have been included in the fee paid by editorial department.

道德声明

本刊发表的论文是作者独立取得的原创性研究成果，无一稿多投；论文内容不涉及国家机密；未曾以任何形式用任何文种在国内外公开发表过；论文内容不侵犯他人著作权和其他权利。若发生一稿多投、侵权、泄密等问题，论文作者将承担全部责任。

The authors of *Space-Integrated-Gound Information Networks* guarantee that their submitted articles are original and contain nothing confidential. The said article is only submitted to *Space-Integrated-Gound Information Networks*. The said article has not been published before and has not been submitted elsewhere for print or electronic publication consideration. The said article is no way whatever a violation or an infringement of any existing copyright or license from the third party. Otherwise, the authors of the said article shall take the blame for the violation or infringement of the related copyright and the leakage of secrets.

天地一体化信息网络

Space-Integrated-Ground Information Networks



ISSN 2096-8930



发行代号：国内80-791 2021年6月20日出版 定价：60.00元