

文章编号:1001-893X(2011)03-0001-03

中继卫星 SMA 系统前向链路多波束形成技术^{*}

施为华

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:提出了一种新的中继卫星前向 SMA(S 频段多址)系统前向链路中多波束形成方法,即在地面采用数字移相代替中继星上模拟移相完成波束形成;指出了需要解决的关键技术问题和解决方法,通过“星(用户星)-星(中继星)-地”无线联试,验证了地面数字移相的正确性,对简化中继星上设备、实现前向链路同时多目标能力具有积极意义。

关键词:TDRSS;测控系统;S 频段多址系统;多波束形成;数字移相;频分复用

中图分类号:V556.8;TN911 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.03.001

Multi-beam Forming for TDRSS SMA System Forward Link

SHI Wei-hua

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: A new multi-beam forming method using digital phase shifting on ground instead of analog phase shifting on satellite is proposed for forward link of TDRSS(Tracking and Data Relay Satellite System) SMA(S-band Multiple Access) system. The key challenges and solutions are presented. The effectiveness of digital phase shifting on the ground is proved through the“user aircraft-TDRS-ground station”wireless experiment. The technique is meaningful for simplifying onboard equipment and achieving forward multiple objects simultaneous TT&C ability.

Key words: TDRSS;TT&C;SMA system;multi-beam forming;digital phase shifting;frequency division multiplexing

1 引 言

在中继卫星系统(TDRSS)中,为提高其服务能力,需要增加 S 频段相控阵多址(SMA)系统。在 SMA 中采用中继星上相控阵天线实现前向、返向多目标的同时测控。前向、返向波束形成方法对简化中继星上 SMA 系统设备、提高 SMA 系统的使用效率起作决定性的作用。美国已建的三代 TDRSS 中的 SMA 系统前向链路都采用开环方式通过地面发射控制指令实现对中继星上 S 频段相控阵天线各发射阵元射频移相器移相形成波束对准需要跟踪的目标^[1],这样在前向链路中只能以“时分”的方式对不同的用户服务。本文提出了一种新的前向链路移相方法,研制了用户星应答机、中继星相控阵天线和频

分解复用信道、地面频分复用信道和 TDRSS 基带,通过“星-星-地”无线联试验证了地面中频数字移相完成前向链路多波束形成算法的可行性和正确性,最后给出了波束形成关键技术的解决措施。

本文研究表明,采用合适的移相方式和 SMA 系统构成对提高中继星 SMA 的使用效率非常重要。

2 前向链路移相方法

中继卫星 SMA 系统是一个包括地面、中继星、用户星设备的复杂系统。S 频段相控阵天线安装在地球同步轨道的中继星上。为了实现前向多目标测控,有两种多波束形成方式:一种是在中继星上采用模拟的射频移相器使各阵元信号达到用户星的相位相同,达到各阵元信号同相相加使用户星接收信号

^{*} 收稿日期:2010-12-22;修回日期:2011-03-16

信噪比最大;另一种方式是在地面中频上完成各阵元的数字移相代替中继星上的射频模拟移相,达到用户星接收信号信噪比最大的目的。

采用星上模拟移相时,前向链路对不同的用户星需要采用“时分”的方式实现多目标测控。由于前向遥控指令数据量相对较少,时分方式也能满足任务需求,这也是国外中继卫星 SMA 系统采用的方法。但采用“时分”方式会带来使用上的一些问题,其中有两个主要问题:一是对一个确定的用户星在整个“可见”的范围内只有在波束对准的时间范围内能够进行测距、测速;二是中继星上相控阵每个模拟移相器的移相值是由地面终端站通过 TT&C 链路发到中继星上,中继星应答机解调出移相值后送各移相器完成移相形成波束指向用户星。

采用地面中频数字移相即可以与星上移相一样“时分”完成多目标功能,也可以同时形成多个波束同时对准多个用户星。时分方式与星上移相相比减少了星上移相器,同时也不需要利用 TT&C 通道解调出地面发到星上各移相器的移相值,这样既减少了星上设备,也不需要在地面移相控制指令传到中继星上,提高了 SMA 系统前向链路的可靠性。

地面中频数字移相还可以在地面采用频分复用(FDM)、中继星上解频分复用(DFDM)信道代替“单频点”的星、地信道实现每个目标、每个阵元的移相,同时形成多个对准用户星的波束。这样不仅避免了利用 TT&C 通道发送各阵元的移相值,还可以在整个可见范围内对多个目标同时进行测距、测速。地面中频数字移相的实现框图如图 1 所示。

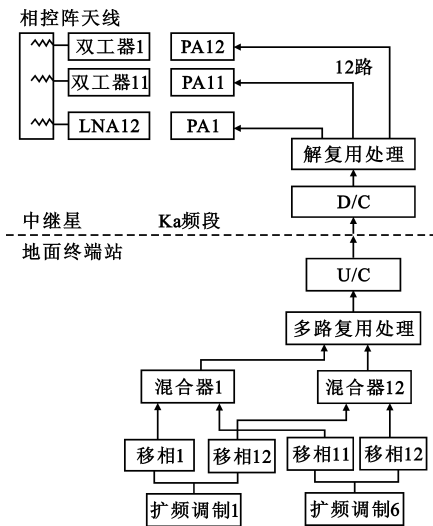


图 1 地面 SMA 前向链路多波束形成实现框图
Fig.1 SMA forward link multi-beam forming

3 前向多波束形成算法

为使各用户星接收的信噪比最大,天线阵的主波束应对准用户星方向,以此确定阵的加权系数,阵的波束方向图函数^[2]

$$f(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N w_i e^{j(k\rho_i \cdot e_r(\theta, \phi) + \varphi_i)} = \mathbf{W}^T \boldsymbol{\Phi} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{W}$ 为权系数向量, $\boldsymbol{\Phi}$ 为天线阵各阵元发射电波方向达到用户星天线的相位分布,即:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} e^{j(k\rho_1 \cdot e_r(\theta, \phi) + \varphi_1)} \\ e^{j(k\rho_2 \cdot e_r(\theta, \phi) + \varphi_2)} \\ \vdots \\ e^{j(k\rho_N \cdot e_r(\theta, \phi) + \varphi_N)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

为使各阵元输出信号达到用户星能同相叠加产生最强信号,阵列加权使各阵元的相位偏移量应等于电波空中传播引起的相位偏移量和电波在阵元发射处相位之和的负值,即加权系数等于目标方向 (θ_d, ϕ_d) 的 $\boldsymbol{\Phi}_d$ 的共轭。式(2)中 $k = 2\pi/\lambda$, $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$ 为各阵元到坐标原点的矢径,代表阵元位置,由安装尺寸决定; $e_r(\theta_d, \phi_d)$ 为指向目标方向 (θ_d, ϕ_d) 的方向矢量,点积 $\rho_i \cdot e_r(\theta_d, \phi_d)$ 为各阵元位置矢径在目标方向上的投影,代表各阵元接收平面波信号时的路径差; φ_i 是各阵元发射载波的初相。相控阵天线排列方式和安装尺寸确定后,就可确定 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$, 知道目标方向 (θ_d, ϕ_d) 和信号波长 λ 后,标校出各阵地面到中继星阵元的相位差就可依据上式计算出各阵元的相位加权系数。

4 关键技术和解决措施

(1) 中继星上相控阵天线、信道相位、幅度不一致性引起合成增益损失

卫星参数变化会造成相位和增益的随机漂移,会进一步降低波束形成的精度,造成合成增益损失。由于前向链路采用开环波束形成方式,这种损失不可避免。

星载设备的热循环和电离层周日变化对星载设备相位稳定性有影响。中继星 SMA 元器件随温度时间变化预计昼夜变化最大 40℃, 因此,星载设备

在设计时应保证即使温度变化 40℃,其均方根相位误差小于 15°,中继星上设备均方根相位误差变化小于 3°/h。

另外,24 h 内电离层中自由电子密度从 $10^{11}/\text{m}^3$ 变化到 $10^{12}/\text{m}^3$,30 路信道任意两路间相位误差最大 113°。假设在 30 路频分复用信道范围内相对相位误差线性地增加,白天 – 黑夜相位误差的变化呈正弦规律变化,则均方根相位误差变化大约是 5°/h。中继星上相控阵天线、信道相位、幅度不一致性引起的 n 个阵元的合成增益损失^[3]

$$G_{\text{loss}} = 10\lg\left[1 - \frac{n-1}{n}(\sigma_{\theta}^2 + \sigma_A^2)\right] \quad (3)$$

式中, σ_{θ}^2 为相位均方误差, σ_A^2 为幅度均方误差。

如果按 3 h 相位变化考虑,则总的相位均方误差为 0.37 rad,幅度变化的均方根为 9%,则反向 30 个接收阵元总的合成损失为 0.36 dB。因此,需要在地面建立标校站,接收中继星相控阵天线各阵元信号,标校出各阵元间的相位和幅度变化,在波束形成的加权系数中抵消其变化。

(2)星地复用、解复用信道的设计

在前向链路中,由于中继星 SMA 系统采用了地面 12 路通道的解复用、星上 12 路通道的复用,这与通常的相控阵系统有极大不同。根据对 SMA 系统的分析和试验,首先需要采用 7 MHz 带宽的声表滤波器隔离 12 路信号。由于滤波器带宽很窄,需要在通道间隔度、带内波动、带内群时延间进行折衷选择以使系统性能最佳。通道复用、解复用信道的群时延控制在地面复用、星上解复用通道中,每个通道带宽大约为 7.5 MHz。每个通道间必须保证一定的隔离度(35 ~ 40 dB),这就要求各通道滤波器带宽窄、矩形系数好。这样的滤波器基本上只能采用声表滤波器,在带宽 7.5 MHz 内其群时延带内波动在十几纳秒到 30 ns 间。如此大的群时延波动在过去的测控、通信系统中是难以想象的,这就需要在设计时控制各通道群时延波动。

(3)数字移相

实现前向链路同时多目标即同时多波束的关键

是在地面采用数字移相代替中继星上的模拟移相。笔者在试验中研制了一个前向波束形成器,同时产生多个目标的信号,同时对 12 路阵元信号进行移相,将不同目标同一阵元的信号相加,最后对送 12 个阵元的 12 路信号进行频分复用。“星 – 星 – 地”无线模拟试验表明,在地面中频 D/A 前进行的数字移相完全能够等效在星上射频上的模拟移相。

5 结束语

本文介绍了中继卫星系统前向链路移相方法,提出了采用地面中频数字移相代替中继星上射频模拟移相的新方法,给出了实现原理框图和多波束形成算法。采用本文提出的前向地面数字移相和波束形成方法,可以实现中继卫星 SMA 系统同时多目标在整个可见范围内的遥测、遥控和测距、测速,可以提高星上设备的可靠性,提高 SMA 系统的能力。

参考文献:

[1] Jeffrey J Gramling, Nicholas G Chrissotimos. Three Generations of NASA's Tracking and Data Relay Satellite System [C]//Proceedings of SpaceOps 2008 Conference. [S.l.]: AIAA Inc., 2008.

[2] 易润堂. TDRSS 中继星相控阵天线地面多波束形成自适应处理技术[J]. 电讯技术, 1999, 39(z3): 43 – 48.

YI Run – tang. TDRSS Delay phased – array antenna ground multi – beam forming adaptive processing technology [J]. Telecommunication Engineering, 1999, 39 (z3): 43 – 48. (in Chinese)

[3] Chen C C, Burnett J W. TDRS Multiple Access Channel Design [C]// Proceedings of National Telecommunications Conference. Los Angeles, CA: IEEE, 1977: 1 – 7.

作者简介:

施为华(1963 –),男,四川简阳人,1997 年获理学硕士学位,现为高级工程师,主要从事航天测控通信总体技术方面的研究。

SHI Wei – hua was born in Jianyang, Sichuan Province, in 1963. He received the M.S. degree in 1997. He is now a senior engineer. His research concerns aerospace TT&C technology and system design.

Email: shiwh009@163.com