

星载功率动态分配网络幅相误差校准方法

汤琦¹, 蒋军敏¹, 夏猛²

(1. 西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121; 2. 西安科技大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对移动通信卫星不同波束通信业务量分布不均衡导致下行波束的发射功率差异大问题, 给出功率动态分配网络实现结构, 该结构根据通信业务量需求自适应分配发射波束功率, 同时保证功率放大器的工作点基本一致; 针对功率动态分配网络在存在幅相误差时的输出信号互耦, 从而导致波束性能急剧下降问题, 提出一种功率动态分配网络幅相误差校准方法。该方法利用正交零相关 (ZCZ, zero-correlation zone) 序列在零相关区间内正交互相关特性实现校准信号间的解耦; 零相关区间内具有优异的自相关特性, 通过降低校准信号的发射功率, 使校准的同时不影响正常通信性能。性能仿真和远场测试结果表明: 在校准信号功率比通信信号功率低 10 dB 时, 校准后的幅度误差小于 0.1 dB, 相位误差小于 0.3°, 实测波束主瓣内增益损失小于 0.2 dB。

关键词: 卫星通信; 功率动态分配; 幅相误差校准; ZCZ 序列

中图分类号: TN957

文献标识码: A

Amplitude and phase errors calibration method in satellite-borne dynamic power allocation network

TANG Qi¹, JIANG Jun-min¹, XIA Meng²

(1. Electrical Engineering College, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China;

2. Communication and Information Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: For the mobile communication satellite each beam communication traffic distribution was not balanced, leading to differences in transmission power of downlink beam. The implementation architectures of dynamic power allocation network was given, which could allocate the transmitting beam power automatically according to the traffic demand, at the same time ensured the high efficiency of power amplifier. Because the performance of dynamic power allocation network was severely impaired by the mutual coupling among signals when amplitude/phase mismatch was existed, which led to a sharp drop in beam performance. A calibration method for the amplitude and phase errors was proposed. The decoupling of calibration signal was realized by using the cross-correlation orthogonal characteristic of the orthogonal zero-correlation zone (ZCZ) sequences in the zero correlation interval, and communication was free from calibration by reducing the transmit power for the excellent self-correlation characteristic of the ZCZ sequences. Performance simulation and far field test show that under the condition that the calibration signal power is less than the normal signal 10 dB, the amplitude error is less than 0.1 dB, the phase error is less than 0.3°, and the gain loss within the main lobe is less than 0.2 dB after calibration.

Key words: satellite communication, dynamic power allocation, amplitude and phase errors calibration, ZCZ sequence

1 引言

移动通信卫星系统一般采用多个点波束实现广域覆盖, 达到增强辐射增益、支持小终端移动通信业务的目的, 如 Thuraya 星形成 245 个点波束,

Imarsat4 卫星形成 228 个点波束^[1,2]。在不同波束覆盖区内人口分布、经济发展不均衡, 导致不同波束通信业务量分布也不均衡, 即每个下行波束的发射功率差异较大。而传统的通信卫星采用每个发射波束对应一个功率放大器, 导致功率放大器的工作

收稿日期: 2016-05-29; 修回日期: 2017-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61302133); 陕西省教育厅科研计划基金资助项目 (No.14JK1678)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61302133), Special Research Program of Education Department of Shaanxi Provincial Government (No.14JK1678)

点随波束内通信业务量的变化而变化,极大降低了系统功率利用率。为此,本文给出了应用于多波束移动通信卫星的功率动态分配网络实现结构,该结构能根据通信业务量需求自适应分配每波束功率,即在卫星载荷发射总功率保持不变的情况下,每波束的发射功率能根据通信业务量需求自适应分配,同时保证所有功率放大器的工作点基本一致。

功率动态分配网络要求每个通道的幅度和相位一致性完全相同,否则会导致波束间信号互耦,影响系统性能,所以必须对通道幅度和相位一致性误差进行估计和校准。通道幅相一致性误差直接影响 DOA 估计性能和波束形成性能,国内外学者对阵列通道幅相误差估计和校准问题进行了深入的研究^[3-16]。文献[3]分析了幅相误差对 MUSIC 算法分辨性能的影响。文献[4]针对非高斯入射源,提出了基于独立成分分析(ICA, independent component analysis)法的阵列通道幅相误差校正算法。文献[5]针对线性阵列,利用协方差矩阵对角线元素之间的相关性,提出了一种幅相误差自校正算法。文献[6]利用阵列输出协方差矩阵及其共轭的 Hadamard 积构造新的协方差矩阵,然后对构造的协方差矩阵分解,进而求得阵列幅相参数的估计值,与文献[5]相比,该方法拥有更高的估计精度,但也增加了运算量。文献[7]利用阵列接收数据和其共轭的点积估计幅相误差,文献[8]对其进行了改进,但这 2 种方法的输入信号数目需要 2 个或 2 个以上。上述几种幅相误差估计算法都属于无参考源自校正算法,适用于特定的应用场合,并且计算量较大。有参考源校正算法由于计算量小、精度高、适用条件广,在工程中得到广泛使用。文献[9]提出了一种基于特征分解的有源校正算法,其优点是估计精度高,但该方法需要较多的校正源且校正过程复杂。文献[10]提出了一种基于传统数据模型估计的幅相误差有源校正算法(EACDM, estimation algorithm for the conventional data model),其优点是只利用了校正源的方位信息,减小了计算量,但该算法性能受信噪比和增益误差的影响大,在信噪比较低或增益误差较大时,该算法的性能严重下降。文献[11]基于多级维纳滤波器提出了一种阵列幅相误差快速校正算法,该算法计算量小,在高信噪比时具有较好的性能。针对多波束卫星天线测试问题,文献[12,13]给出一种近场有源校准方法,该方法适用于校准信

号信噪比高的场合。文献[14]提出了远场有源校准方案,即通过在地面关口站接收星载天线发射的信号来估计卫星发射通道幅度和相位一致性误差,由于星地传输路径较远、易受周围环境干扰,所以校准必须在很短的时间内完成并且覆盖区域内没有干扰才能保证测量结果的平稳可靠。文献[15]采用 m/WH 复合码作为校准源,文献[16]采用伪随机码作为校准源,采用这 2 种校准源能有效降低校准信号发射功率的需求,但这 2 种方法适用于独立通道幅相误差校准,并且不能对多通道同时校准。

由于在功率动态分配网络中有功分器,使同一个发射波束信号同时存在于多个发射通道中,即每个发射通道上存在多个发射波束信号,信号间存在耦合,所以对于功率动态分配网络,上述幅相误差校准方法性能急剧下降,甚至不再适用;对通信卫星来说,在利用有参考源校正算法进行幅相误差估计和校准时,不允许校准信号影响通信性能,上述方法也没有考虑校准信号对通信性能的影响。为此,本文提出了一种功率动态分配网络幅相误差校准方法,该方法采用 ZCZ 序列作为校准信号,在功率动态分配网络的输出端口仅仅耦合一路校准信号,利用 ZCZ 序列在零相关区间内互相关函数,具有优异的正交性能,实现校准信号间的解耦;ZCZ 序列在零相关区间内自相关函数具有高处理增益特性,通过降低校准信号的发射功率(小于或等于噪声功率),使校准的同时不影响正常通信性能,从而满足移动通信卫星实时不间断通信的需求。所提出的方法也可以应用于通信、雷达、声呐等多输入多输出波束形成网络中。

2 动态功率分配网络实现结构

功率动态分配网络模型(以 4 输入 4 输出为例,在实际工程应用中可以为 2 的任意整数倍)如图 1 所示,由输入 Butler 矩阵、上变频器、功率放大器和输出 Butler 矩阵组成。其中,上变频器和功率放大器为有源器件,卫星在轨长时间工作时其幅相会发生变化;输入 Butler 和输出 Butler 矩阵为无源器件,采用微带线实现移相、功率分配和功率合成功能,属于无源器件,在轨长时间工作,其性能基本保持不变。所以,功率动态分配网络幅相误差校准主要是估计和校正上变频器和功率放大器等有源器件的误差。

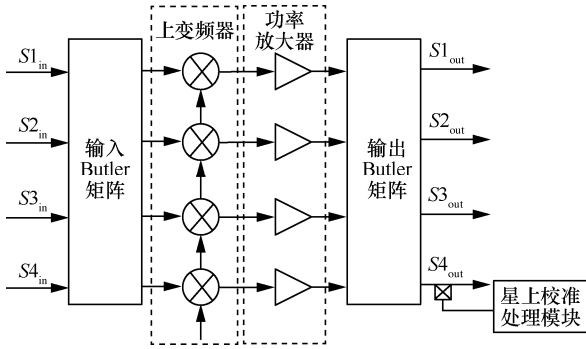


图1 4输入4输出功率动态分配网络实现结构

设输入 Butler 矩阵传递函数为

$$\mathbf{B}_{in} = \begin{bmatrix} 1 & -j & -j & -1 \\ -j & -1 & 1 & -j \\ -j & 1 & -1 & -j \\ -1 & -j & -j & 1 \end{bmatrix}$$

输出 Butler 矩阵 \mathbf{B}_{out} 为输入 Butler 矩阵的转置。

混频器和功率放大器的传递函数是一个对角阵, 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 e^{j\varphi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 e^{j\varphi_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 e^{j\varphi_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_4 e^{j\varphi_4} \end{bmatrix}$$

其中, a_i 、 φ_i 分别为第 i 通道的幅度和相位响应。

则得到功率动态分配网络的传递函数为

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{B}_{out} \times \mathbf{A} \times \mathbf{B}_{in} \times \mathbf{S}_{in} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{S}_{in} = [S1_{in} \ S2_{in} \ S3_{in} \ S4_{in}]'$ 和 $\mathbf{S}_{out} = [S1_{out} \ S2_{out} \ S3_{out} \ S4_{out}]'$ 分别为输入和输出校准信号。由式(1)可解得

$$\begin{aligned} S1_{out} &= (A_1 + A_2 + A_3 + A_4)S1_{in} + (-jA_1 - jA_2 + jA_3 + jA_4)S2_{in} + \\ &(-jA_1 + jA_2 - jA_3 + jA_4)S3_{in} + (-A_1 + A_2 + A_3 - A_4)S4_{in} \\ S2_{out} &= (jA_1 + jA_2 - jA_3 - jA_4)S1_{in} + (A_1 + A_2 + A_3 + A_4)S2_{in} + \\ &(A_1 - A_2 - A_3 + A_4)S3_{in} + (-jA_1 + jA_2 - jA_3 + jA_4)S4_{in} \\ S3_{out} &= (jA_1 - jA_2 + jA_3 - jA_4)S1_{in} + (A_1 - A_2 - A_3 + A_4)S2_{in} + \\ &(A_1 + A_2 + A_3 + A_4)S3_{in} + (-jA_1 - jA_2 + jA_3 + jA_4)S4_{in} \\ S4_{out} &= (-A_1 + A_2 + A_3 - A_4)S1_{in} + (jA_1 - jA_2 + jA_3 - jA_4)S2_{in} + \\ &(jA_1 + jA_2 - jA_3 - jA_4)S3_{in} + (A_1 + A_2 + A_3 + A_4)S4_{in} \end{aligned} \quad (2)$$

当 $A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = a$, 即有源通道的工作点一致、不存在幅相误差时, 由式(2)可得

$$\begin{cases} S1_{out} = 4a \times S1_{in} \\ S2_{out} = 4a \times S2_{in} \\ S3_{out} = 4a \times S3_{in} \\ S4_{out} = 4a \times S4_{in} \end{cases} \quad (3)$$

由以上分析可知, 当功率动态分配网络每个通

道的有源部件的幅度和相位一致时, 得到输出信号和输入信号一一对应, 如式(3)所示, 并且根据输入信号功率大小自动分配系统的总功率(4个功放的总功率); 否则输出信号和输入信号关系如式(2)所示, 输出信号是所有输入信号的函数, 发射波束信号间存在耦合, 严重影响通信性能。所以在功率动态分配网络中必须对有源部件进行校准, 保证每个通道的幅度和相位一致。

3 功率动态分配网络幅相误差校准算法

3.1 算法原理

分别用校准信号 $S1_{in}$ 、 $S2_{in}$ 、 $S3_{in}$ 、 $S4_{in}$ 和输出信号(由式(2)得到)做相关运算, 并令 $P_{S1_{in}}$ 、 $P_{S2_{in}}$ 、 $P_{S3_{in}}$ 、 $P_{S4_{in}}$ 分别为校准信号 $S1_{in}$ 、 $S2_{in}$ 、 $S3_{in}$ 、 $S4_{in}$ 的发射功率谱, $S4_{out}$ 和 $S1_{in}$ 、 $S2_{in}$ 、 $S3_{in}$ 、 $S4_{in}$ 的互功率谱分别为 P_{S41} 、 P_{S42} 、 P_{S43} 、 P_{S44} 。校准信号为正交序列, 即 $S1_{in}$ 、 $S2_{in}$ 、 $S3_{in}$ 、 $S4_{in}$ 相互正交, 则可得

$$\begin{cases} P_{S41} = (-A_1 + A_2 + A_3 - A_4)P_{S1_{in}} \\ P_{S42} = (A_1 - A_2 + A_3 - A_4)e^{j\frac{\pi}{2}}P_{S2_{in}} \\ P_{S43} = (A_1 + A_2 - A_3 - A_4)e^{j\frac{\pi}{2}}P_{S3_{in}} \\ P_{S44} = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4)P_{S4_{in}} \end{cases} \quad (4)$$

假设输入校准信号的功率相同都为归一化功率谱, 即 $P_{S1_{in}} = P_{S2_{in}} = P_{S3_{in}} = P_{S4_{in}} = 1$, 则由式(4)可解得

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{2} [(-P_{S41} + e^{-j\frac{\pi}{2}}P_{S42}) + (e^{-j\frac{\pi}{2}}P_{S43} + P_{S44})]P_{S44} \\ A_2 = \frac{1}{2} [(-P_{S41} + e^{-j\frac{\pi}{2}}P_{S42}) + (e^{-j\frac{\pi}{2}}P_{S43} + P_{S44})]P_{S44} \\ A_3 = \frac{1}{2} [(P_{S41} + e^{-j\frac{\pi}{2}}P_{S42}) + (-e^{-j\frac{\pi}{2}}P_{S43} + P_{S44})]P_{S44} \\ A_4 = \frac{1}{2} [(-P_{S41} + e^{-j\frac{\pi}{2}}P_{S42}) + (-e^{-j\frac{\pi}{2}}P_{S43} + P_{S44})]P_{S44} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可计算得到通道有源部件的幅相误差分布。

3.2 校准信号设计

由 3.1 节分析可知, 对功率动态分配网络幅相误差校准时, 需要保证校准信号为正交信号, 否则会产生多址干扰, 并且相关接收机只有在码元完全同步时才具有最优性能。由于传播延时, 通过地面关口站发送的校准信号与参考信号间不同步, 这就

要求校准信号必须具有强自相关性、零互相关性。文献[15]利用 Walsh 码较好的正交性,采用 m /Walsh 复合码进行通道一致性校准,但是 m /Walsh 序列的正交性建立在码字之间不存在相位偏移的前提下,也就是说在最佳匹配点处的输出不包含多址干扰成分,但在其他位置却仍然有多址干扰造成的“杂峰”,特别是当多址干扰本身的功率强于期望信号时,期望信号的相关峰会淹没在杂峰中,导致对小功率期望信号无法正常捕获。图 2 给出了 2 个彼此功率差 15 dB 的同族补零 m /Walsh 序列经过合路后

在匹配滤波器输出端得到的结果。由图 2 可知,大功率分量的相关峰非常明显,易于通过门限判决找到最佳采样点,而小功率分量的相关峰完全被杂峰淹没,无法用常规方法实现捕获;由于多址干扰抬高了相关处理后的噪声,导致幅度和相位估计误差较大。

由 Walsh 界理论可知这种同时具备理想自相关和互相关特性的码字并不存在。但是存在一类特殊的 ZCZ 序列,其自相关函数和互相关函数在零相关窗口内同时具备理想自相关和互相关特性。图 3 给

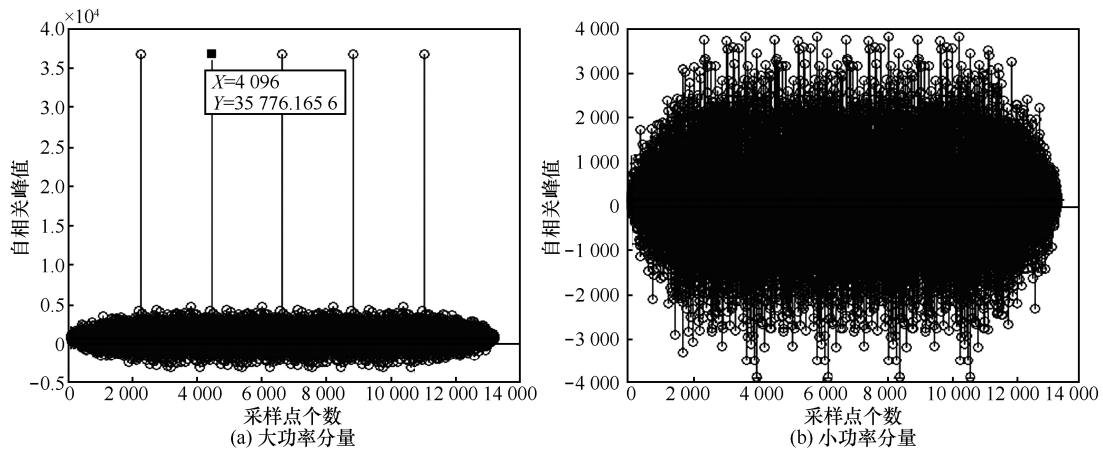


图 2 相关处理后的输出

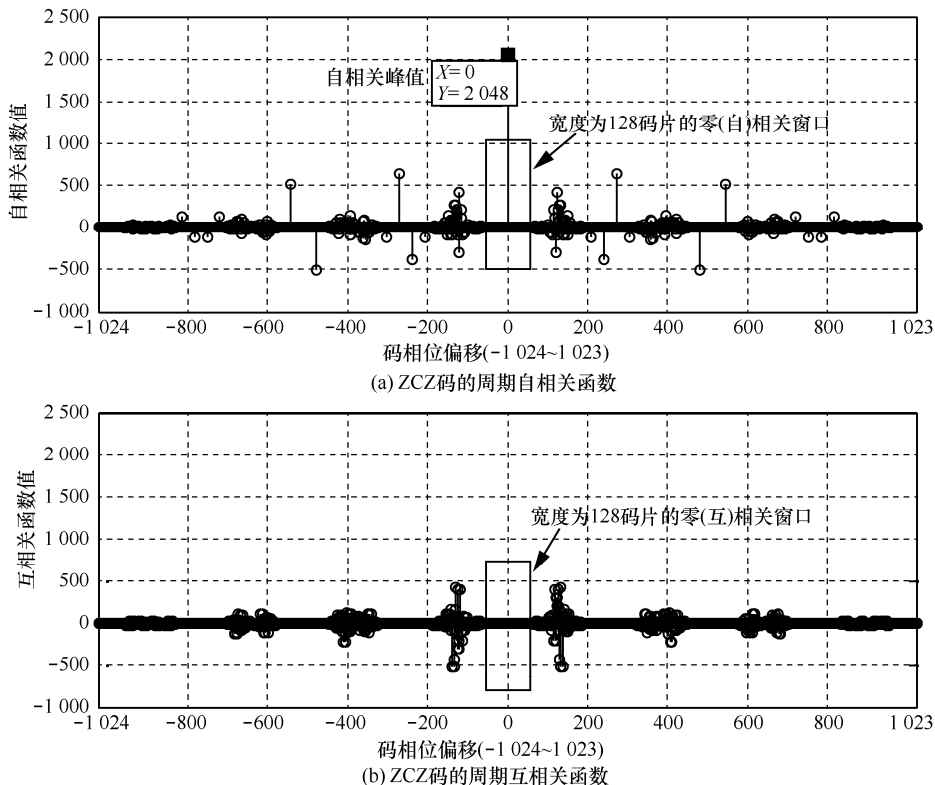


图 3 ZCZ 序列的自相关函数和互相关函数

出了长度为 1 024 的 ZCZ 序列的自相关函数以及它和另一个同组 ZCZ 序列的互相关函数,从图 3 中可知在零相关窗口(图 3 中矩形框)内同时具备理想自相关和互相关特性,综合以上分析,校准信号采用 ZCZ 系列。

3.3 幅相误差校准算法

综上,功率动态分配网络幅相误差校准算法如下。

1) 地面关口站在对应的 4 个波束内发送相同功率的 ZCZ 码族作为校准信号。

2) 星上校准处理模块耦合 $S4_{out}$ 作为接收到的校准信号(如图 1 所示)。

3) 星上校准处理模块根据式(4)依次用本地 ZCZ 码族(原码)和 $S4_{out}$ 进行相关,得到多通道幅度和相位响应函数。

4) 根据式(5)计算得到每个通道幅度和相位估计值,并求其多次平均,消除白噪声对估计精度的影响。

5) 计算幅度、相位估计值与理想值之差得到幅相误差,星上校准处理模块通过遥测下发幅相误差到关口站,关口站根据幅相误差值进行补偿。

4 性能分析

4.1 性能仿真分析

仿真参数设置如下:4 组正交 ZCZ 码,每组码长为 4 096,调制方式为 BPSK,载频为 2.1 GHz,ZCZ 码循环发送,仿真次数为 500 次;4 个通道幅度误差均服从方差为 1.5 dB 的正态分布,相位误差均服从方差为 30° 的正态分布。

图 4 分别对文献[15]提出的 PN 码、文献[16]提出的 m/WH 码和本文提出的 ZCZ 码校准性能进行了比较,从图 4 中可以看出,在低信噪比下,ZCZ 码具有优异的估计性能。

图 5 给出了本文的校准方法在不同信噪比、不同平均次数下分别采用 m/WH 码和 ZCZ 码得到通

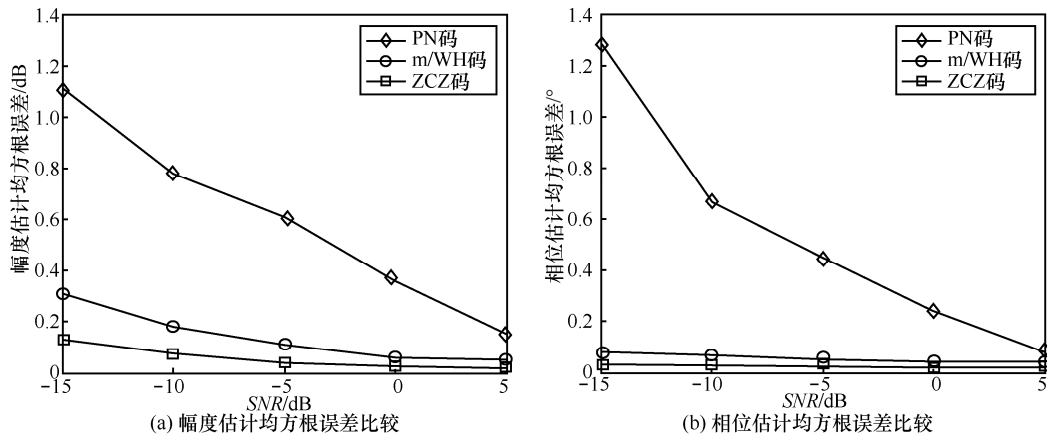


图 4 3 种校准码源性能比较

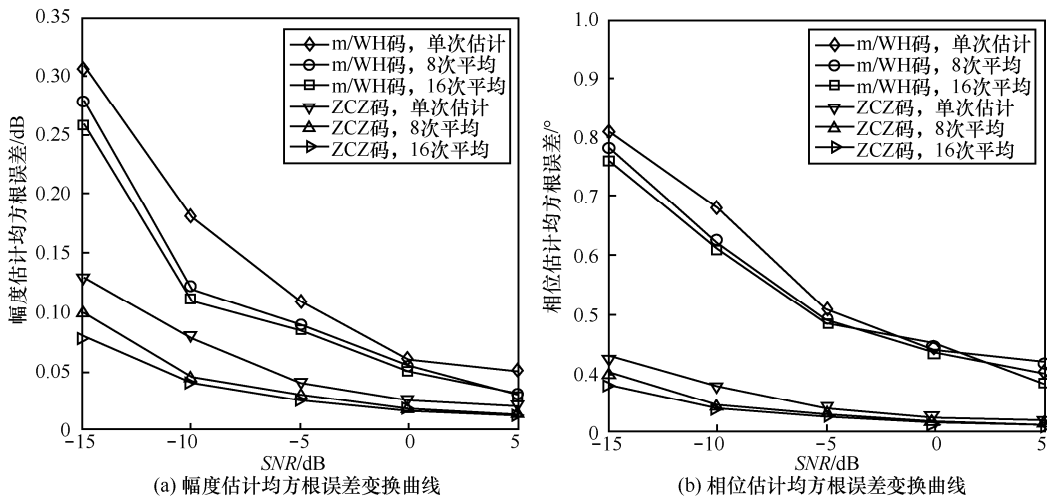
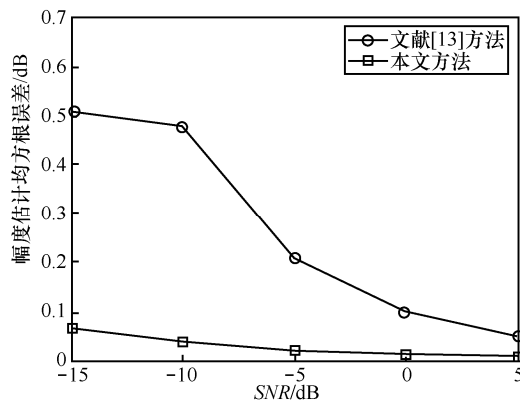


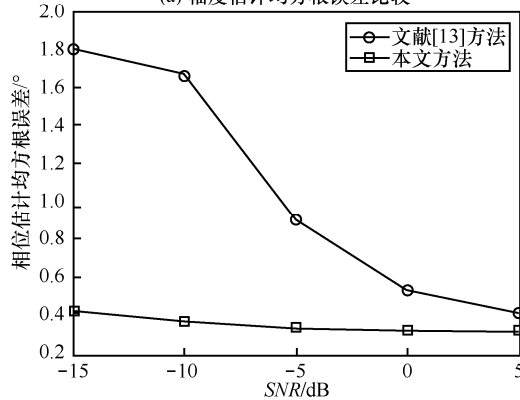
图 5 幅度、相位估计均方根误差随信噪比变换曲线

道幅度相位误差估计均方根，从图 5 中可以得出在信噪比为 -10 dB 时，即校准信号功率比通信信号功率低 10 dB 以上，采用 ZCZ 码得到的幅度估计均方根误差小于 0.1 dB、相位估计误差小于 0.4°，同时由于校准信号功率比正常通信信号功率低 10 dB 以上（解调门限为 10 dB 时，校准信号功率小于或等于噪声功率），所以校准时不会影响正常通信性能。从图 5 中可以看出：在低信噪比时采用 ZCZ 码性能明显优于 m/WH 码，这是由于 Walsh 序列在低信噪比时期望信号的相关峰会淹没在杂峰中，导致相位偏移估计误差增大，使其性能变差；在低信噪比下，相干累积后测量精度都有明显提高。

采用 ZCZ 码，对本文算法和文献[13]的方法进行了对比，结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出在高信噪比下，这 2 种方法估计精度都较高，但在低信噪比下，本文算法估计性能优异，信噪比的变化对估计性能影响不大，具有较强的顽健性，工程应用中设置校准信号的功率谱低于或等于噪声功率谱，从而不影响正常通信信号的信噪比，在实现校准的同时不影响正常通信。



(a) 幅度估计均方根误差比较



(b) 相位估计均方根误差比较

图 6 2 种估计方法的性能比较

4.2 远场实验

利用航天 504 所的天线测试场对提出的算法进行了远场性能测试，实验条件如下：由 3 组如图 1 所示的功率动态分配网络构成 12 输入 12 输出多波束系统，该系统安装在 2 维转台上，测试时转台按一定的步进转动，由远场接收天线接收并计算出波束的性能；通道一致性校准采用本文方法的 ZCZ 码，码长为 4 096，输入为 70 MHz 中频信号，输出为 2.1 GHz 的射频信号，中频率校准信号输入功率为 -15 dBm，即校准信号发射功率与系统噪声功率相当。

表 1 是系统校准前和校准后的幅相实测值，图 7 是 1 号波束校准后波束增益误差等高线，图 8 是 1 号波束 0 度切面的理论增益和实测增益。从实测结果可以得出，利用本文提出校准算法得到的幅度误差小于 0.1 dB，相位误差小于 0.3°，并且校准后在主瓣内波束增益实测值和理论值基本一致。

表 1 幅相分布测试结果

通道号	校准前		校准后	
	幅度/dB	相位/°	幅度/dB	相位/°
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.288	0.360	-0.039	0.080
3	0.350	4.833	-0.087	-0.090
4	0.277	4.130	-0.072	0.076
5	-1.070	3.470	-0.040	0.296
6	-0.588	7.420	-0.030	0.256
7	0.287	3.990	-0.070	0.090
8	-1.140	2.944	-0.044	0.240
9	0.295	4.415	-0.070	0.040
10	-1.035	-1.270	-0.036	0.270
11	0.255	0.686	0.029	0.245
12	0.208	0.528	-0.038	0.260

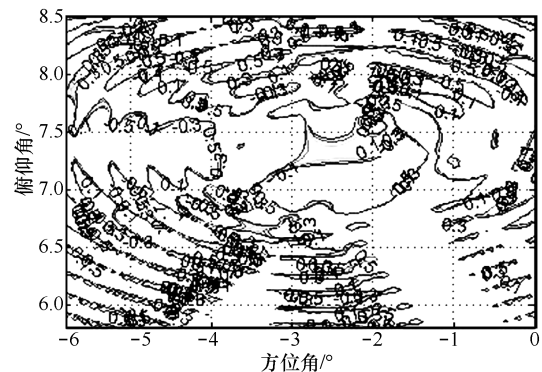


图 7 1 号波束校准后实测误差等高线

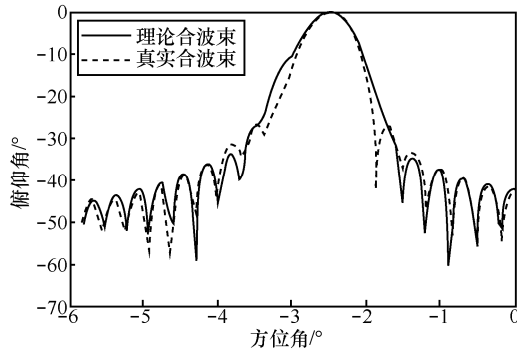


图8 1号波束校准后0度切面

5 结束语

针对多波束移动通信卫星业务不均衡的实际需求,给出了功率动态分配网络实现结构,该结构能根据通信业务量需求自适应分配每波束功率。针对功率动态分配网在通道间存在幅相误差时,其发射的波束信号间产生耦合问题,提出一种功率动态分配网络幅相误差校准方法,推导了算法原理,分析并设计了校准信号形式,针对实际应用对提出的算法进行性能仿真和远场测试,结果表明利用本文的校准方法在校准信号功率小于正常通信信号 10 dB 的条件下,校准后的幅度误差小于 0.1 dB、相位误差小于 0.3°,实测波束主瓣内增益损失小于 0.2 dB。

参考文献:

- [1] 易克初,李怡,孙晨华,等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015, 36(6): 1-16.
YI K C, LI Y, SUN C H, et al. Recent development and its prospect of satellite communication[J]. Journal on Communications, 2015, 36(6): 1-16.
- [2] 李怡,田斌,易克初,等. 基于多波束 GEO 卫星的宽带移动通信系统[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(2): 400-408.
LI Y, TIAN B, YI K C, et al. A broadband mobile communication system based on multi-beam GEO satellite[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(2): 400-408.
- [3] 王鼎,王超,吴瑛. 幅相误差对 MUSIC 算法空间谱及分辨性能影响的分析[J]. 通信学报, 2010, 31(4): 55-63.
WANG D, WANG C, WU Y. Analysis of the effects of the amplitude-phase errors on spatial spectrum and resolving performance of the MUSIC algorithm[J]. Journal on Communications, 2010, 31(4): 55-63.
- [4] KIM J, YANG H, JUNG B, et al. Blind calibration for a linear array with gain and phase error using independent component analysis[J]. IEEE Antennas and Wireless Letters, 2010, 9(10): 1259-1262.
- [5] LI Y M, ER M H. Theoretical analyses of gain and phase error calibration with optimal implementation for linear equispaced array[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(2): 712-723.
- [6] CAO S H, YE Z F, XU D Y, et al. A hadamard product based method for DOA estimation and gain-phase error calibration[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 1224-1233.
- [7] LIU A, LIAO G, ZENG C, et al. An eigenstructure method for estimating DOA and sensor gain-phase errors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(12): 5944-5956.
- [8] CAO S, YE Z, XU D, et al. A hadamard product based method for DOA estimation and gain-phase error calibration[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2013, 49(2): 1224-1233.
- [9] NG B, LIE J, ER M, et al. A practical simple geometry and gain/phase calibration technique for antenna array processing[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(7): 1963-1972.
- [10] JIANG J J, DUAN F J, CHEN J, et al. Two new estimation algorithms for sensor gain and phase errors based on different data models[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(5): 1921-1930.
- [11] 刘红明,何子述,夏威,等. 无参考信号条件下基于 MSWF 的 DOA 估计算法[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 1979-1983.
LIU H M, HE Z S, XIA W, et al. Estimation of direction of arrival based on MSWF without reference signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 1979-1983.
- [12] LIER E, PURDY D, ASHE J, et al. An on-board integrated beam conditioning system for active phased array satellite antennas[C]//International Conference on Phased array Systems and Technology. 2000: 509-512.
- [13] 沈文亮,杨忠,陈建峰,等. 一种新型相控阵天线校准技术[J]. 电子学报, 2011, 39(12): 2820-2823.
SHEN W L, YANG Z, CHEN J F, et al. A new calibration method of phased array antennas[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(12): 2820-2823.
- [14] MASAYUKI O, RYU M. A remote calibration for a transmitting array antenna by using synchronous orthogonal codes[J]. IEICE Transaction Communication, 2001, E84-B(7): 689-693.
- [15] 赵红梅,王华力,牟善祥. 基于 m/WH 复合码 DBF 发射系统通道误差校正[J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(2): 253-257.
ZHAO H M, WANG H L, MOU S X. DBF Tx systems errors calibration based on m/WH composite codes[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2009, 33(2): 253-257.
- [16] 夏猛,杨小牛. 一种利用 PN 码进行星载 SAR-GMTI 通道校准的新方法[J]. 电波科学学报, 2010, 25(Sup): 17-22.
XIA M, YANG X N. A new method of space-borne SAR-GMTI calibration based on pseudorandom sequence[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(Sup): 17-22.

作者简介:



汤琦(1975-),男,安徽枞阳人,博士,西安邮电大学副教授,主要研究方向为阵列信号与通信信号处理、多目标跟踪等。

蒋军敏(1977-),女,河北晋州人,西安邮电大学副教授,主要研究方向为通信信号处理与现代通信网等。

夏猛(1981-),男,陕西安康人,博士,西安科技大学副教授,主要研究方向为通信信号处理与雷达信号处理等。