

# 大功率短波转动天线折合偶极子的应用及调配

文 / 国家新闻出版广电总局无线局维护处 王文雪

国家新闻出版广电总局 2021 台 刘颖

**摘要:** 本文通过对大功率短波转动折合偶极子阻抗的分析和实际测量, 提出了利用自动调谐单元对天线进行全频段、全组态阻抗调配, 以实现良好的宽带性能, 可有效提高该类型天线的设计和使用效率。

**关键词:** 短波 转动天线 折合偶极子 自动调谐

我国于 2003 年引进德国 THALES 公司生产的大功率短波转动天线安装在广电总局 2021 台, 该天线高近 80 米, 宽 76 米, 总重达 200 吨, 安装有背对背的两幅高频和低频宽带幕式天线, 通过水平面内驱动旋转支撑, 带动单根圆筒和立于筒上塔桅, 在 360° 范围内任意旋转, 同时可以选择 2/2、2/4、4/2 和 4/4 多种程式, 实现一幅天线多个方位、多仰角、多波束广播, 替代诸多固定天线群。它跟固定天线群相比, 占地面积少、使用灵活, 适应战备需要。

该天线与常见的短波广播幕式天线相比不仅是旋转和多程式, 还有其带宽和匹配效率, 通过自动调谐单元 (Automatic

Tuning Unit, 简称 ATU) 的调整可实现在 5.9~26.1MHz 短波广播频段优质高效的匹配。笔者根据调机记录及跟踪近几年的维护经验, 对该天线所采用的折合偶极子进行分析研究, 得出该类型宽带天线参数测试方法和调整原理, 并在此基础上提出天线调谐系统的设计思路。

## 1 折合偶极子的原理

常见的短波天线有多种, 包括水平对称振子天线、笼形天线、宽带幕形天线, 菱形天线、鱼骨形天线、对数周期天线。其中以宽带幕形水平对称振子天线的使用最为广泛, 它是由多层多列的全波或半波偶极振子组成的天线阵。其正向发射时以等幅同相电流向每个阵元天线馈电。它的水平方向图由每层阵元天线的数目控制, 垂直方向图由阵元天线的层数和最低层天线的离地高度控制。该天线为了解决天线振子的悬挂, 改变了常用的笼形振子, 采用中心馈电式结构的折合偶极子, 其主要目的是增加天线的

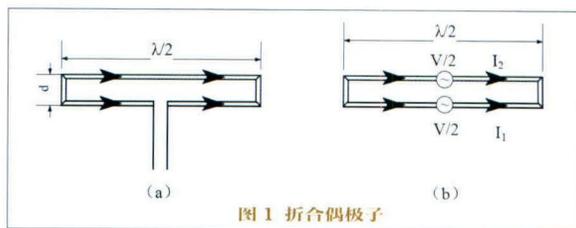


图 1 折合偶极子

带宽, 折合偶极子的结构形成如图 1 所示。

简单的  $\lambda/2$  偶极子具有约  $73\Omega$  的馈端电阻, 需要用阻抗变换器与  $300\Omega$  或  $600\Omega$  的双导线匹配, 而该天线所使用的  $\lambda/2$  偶极子的馈端阻抗接近  $300\Omega$ , 可直接连接具有相同特性的阻抗值的双导线。图 1(a) 所示的双导线折合偶极子由两根  $\lambda/2$  偶极子在外侧两末端连接而成, 两单元上的电流基本上等幅同相。图中两偶极子的导体直径相等, 可以简单地推导其馈端阻抗的近似值, 令施加于天线馈端的电动势为  $V$  分加在两根偶极子上, 见图 1(b), 则有:

$$V/2 = I_1 \times Z_{11} + I_2 \times Z_{22}$$

其中,  $I_1$  是偶极子 1 的馈电电流,  $I_2$  是偶极子 2 的馈电电流,  $Z_{11}$  是偶极子 1 自阻抗,  $Z_{22}$  是偶极子 1 和 2 的互阻抗。

因为  $I_1 = I_2$ , 于是得  $V = 2 \times I_1 \times (Z_{11} + Z_{22})$ 。

进一步, 由于两偶极子很接近, 通常  $d$  是  $\lambda/10$  量级, 故  $Z_{11} \approx Z_{22}$ 。于是得

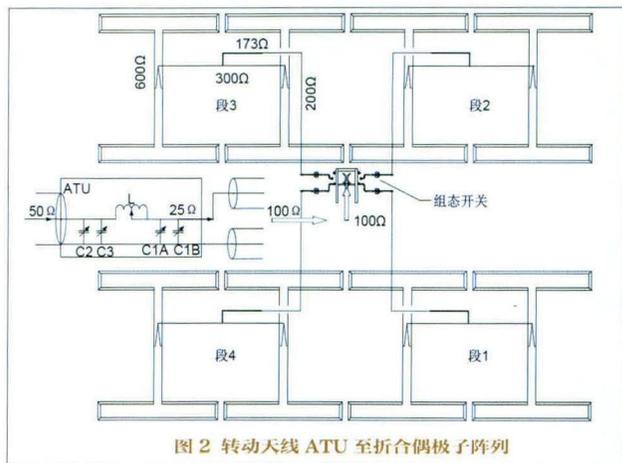


图2 转动天线 ATU 至折合偶极子阵列

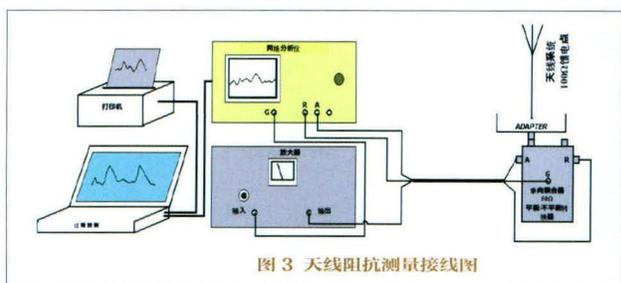


图3 天线阻抗测量接线图

表1 天线输出端各种组态阻抗和驻波比值

F [MHz]	低频 LB2/2			低频 LB2/4			低频 LB4/2			低频 LB4/4		
	R(Ω)	X(Ω)	VSWR									
5.9	125.45	-35.65	1.68	130.01	-55.15	1.73	190.42	-13.73	1.09	181.12	-36.42	1.24
6.2	135.05	23.91	1.52	131.10	14.84	1.54	194.91	9.75	1.06	185.78	-3.77	1.08
7.1	248.13	39.76	1.32	233.61	50.20	1.32	208.27	27.95	1.15	202.49	41.92	1.23
7.5	238.73	19.02	1.22	243.83	29.64	1.27	225.15	29.82	1.20	218.91	35.42	1.21
9.4	198.67	-3.51	1.02	188.93	-1.04	1.06	204.99	-9.85	1.06	194.15	-9.84	1.06
9.9	180.72	23.74	1.17	174.24	31.57	1.24	171.68	12.78	1.18	166.58	23.59	1.25
11.5	252.39	69.24	1.47	269.72	68.50	1.52	250.76	56.51	1.40	266.21	66.31	1.50
12.18	234.64	12.27	1.18	241.18	2.43	1.21	237.15	13.25	1.20	235.11	1.53	1.18
F [MHz]	高频 HB2/2			高频 HB2/4			高频 HB4/2			高频 HB4/4		
	R(Ω)	X(Ω)	VSWR									
13.57	97.36	53.39	2.24	105.62	51.71	2.06	120.91	60.54	1.88	111.38	64.72	2.05
13.9	139.88	85.81	1.85	136.96	87.23	1.90	166.72	109.06	1.85	159.29	121.27	2.02
15.1	301.55	37.27	1.55	267.83	66.64	1.50	293.66	-54.66	1.56	290.12	-20.15	1.46
15.8	241.65	-27.02	1.25	243.85	-13.05	1.23	190.39	-47.64	1.28	182.33	-50.88	1.32
17.45	145.55	9.40	1.38	160.60	3.82	1.25	155.32	25.98	1.34	176.52	23.63	1.19
18	156.36	36.83	1.38	161.77	35.57	1.34	167.00	43.04	1.34	174.41	48.39	1.34
18.9	191.18	59.99	1.36	195.02	48.31	1.28	193.87	63.30	1.38	205.82	45.59	1.25
19.2	211.78	55.23	1.31	205.76	43.52	1.24	209.33	60.06	1.34	209.63	42.26	1.24
21.45	222.71	47.35	1.28	201.42	52.42	1.30	217.64	23.75	1.15	190.36	34.97	1.20
21.85	215.81	32.96	1.19	208.40	45.76	1.26	207.38	24.38	1.13	216.70	38.25	1.22
25.256	230.33	37.52	1.25	233.56	38.56	1.27	226.07	27.61	1.20	224.56	31.33	1.21
26.1	207.74	26.12	1.14	216.73	12.55	1.11	202.26	24.25	1.13	197.82	19.24	1.10

出该天线的阻抗 Z 为： $Z = V/4I_1 \approx 4 \times Z_{11}$ 。

若  $Z_{11} = 73\Omega$ ，则  $Z = 73 \times 4 = 292\Omega$ 。

折合偶极子天线也可看作是二个  $\lambda/4$  的短路线相串联，对于谐振频率波长  $L = \lambda/4$ ，偶极天线与短路线都没有电抗成分，当加到折合偶极子上高频电流的频率在一定范围变化时，出

抗与容抗可以互相补偿，使天线在较宽的频率范围内其阻抗特性的变化不大，这就是折合偶极子具有较宽频带的原理。

## 2 转动天线振子阵列

如图2所示，每段振子由 2/2 四

个折合振子组成，四段 2/2 振子组合形成一 4/4 振子发射阵。振子的支撑点在折合偶极子对称中心点上，这样从馈电点输入的等幅同相电流到该点正好相互抵消，达到机械连接所需的低电位。每一个振子的阻抗为  $300\Omega$ ，这样每一段振子通过两两串联后再两两串联其阻抗仍旧是  $300\Omega$ ，再通过变阻线变成  $200\Omega$ 。由于从平转到组态开关的平衡馈线是  $100\Omega$ ，这样在选择 2/4 组态（段1和段2并联）和 4/2 组态（段1和段4并联）时，通过振子并联得到  $100\Omega$  与馈线匹配，而当选择 2/2 组态（段1）阻抗为  $200\Omega$ ，选择 4/4 组态（段1、段2、段3、段4并联）振子阻抗为  $50\Omega$ ，阻抗变化大，馈线与振子匹配相对困难，这样就要

求通过自动调谐单元（ATU）进行参数调整来实现馈线和振子的阻抗匹配。

理论上，每个振子的阻抗通过传输线到发射机端都是标准的纯阻，而实际上由于材料、工艺、环境等差异，在 ATU 输出端测得的值总有些差别，这样，进行分布参数调整就显得尤为必要。

## 3 转动天线阻抗值的测量

为了便于全面了解该天线的电气特性和为天线调整提供可靠的资料，我们首先根据图3所示天线阻抗测量接线图从组态开关输入端测得天线各种组态的阻抗值和驻波比值，见表1。

## 4 转动天线阻抗匹配实例

从表1可以看出，各种组态的驻波比在 1~2.24 之间，说明该天线振子馈线系统在广播频段内的匹配差别是不可忽视的，需要通过天线自动调谐单元

表2 天线调谐子区域表

低频 4×4=16 子区域				
子频段	HR2/2	HR2/4	HR4/2	HR4/4
6	LB2/2-6	LB2/4-6	LB4/2-6	LB4/4-6
7	LB2/2-7	LB2/4-7	LB4/2-7	LB4/4-7
9	LB2/2-9	LB2/4-9	LB4/2-9	LB4/4-9
11	LB2/2-11	LB2/4-11	LB4/2-11	LB4/4-11
高频 4×6=24 子区域				
13	HB2/2-13	HB2/4-13	HB4/2-13	HB4/4-13
15	HB2/2-15	HB2/4-15	HB4/2-15	HB4/4-15
17	HB2/2-17	HB2/4-17	HB4/2-17	HB4/4-17
18	HB2/2-18	HB2/4-18	HB4/2-18	HB4/4-18
21	HB2/2-21	HB2/4-21	HB4/2-21	HB4/4-21
26	HB2/2-26	HB2/4-26	HB4/2-26	HB4/4-26

来调整（原理见图4），得到更好的匹配效果。

根据天线高低频段和组态，我们将整个天线的调谐子区域划分如表2所示。

从表2可以看出，根据天线所有工作组态，我们将其分为低频LB2/2/0.5-5MHz频段、LB2/2/0.5-7MHz频段、LB2/2/0.5-9MHz频段、

LB2/2/0.5-11MHz频段直到LB4/4/0.5-11MHz频段共16个子区域，高频HB2/2/0.5-13MHz频段、HB2/2/0.5-15MHz频段、HB2/2/0.5-17MHz频段、HB2/2/0.5-18MHz频段、HB2/2/0.5-21MHz频段、HB2/2/0.5-26MHz频段直到HB4/4/0.5-26MHz共24个子区域，共计40个子区域进行调谐预置。在实际调谐预置过程中，根据阻抗圆图的变化可以将每个子区域分成若干个间距不等的子频段，下面我们就LB2/2/0.5-6MHz子频段作为调谐预设值实例。

在测得天线100Ω输入端处LB2/2/0.5-6MHz阻抗值后，我们将天线LB2/2/0.5-6MHz子区域分为15个子频段，见表3。其中有些子频段间隔是均布的，有些子频段间隔是不均布的，主要根据现场阻抗圆图的情况而定，由于现场测得的阻抗圆图呈不规则图形，在平滑的地方我们可以将子频段间隔设大些，这里最大子频段间隔为30kHz，以不影响驻波比为宜。在一些阻抗圆图存在拐点的地方，我们就得细心地将子频段间隔设小些，以保证驻波比在合适的范围内。然后利用史密斯圆图设置输入阻抗值，匹配计算出π网络各调谐器件的值，再根据现场设备和电容电感量化表调整π网络各器件到相应值，接上网络分析仪看驻波比，若有偏差再进行相应的微调，使调整后该点组态频率点达到调试要求，将各器件调谐量化数值存入相对应的数据表中保存起来，待天线工作于该频段是直接调用这一调谐值即可。如图5所示。

以此为例，40各子区域，每个子区域分成若干个子频段，每个子频

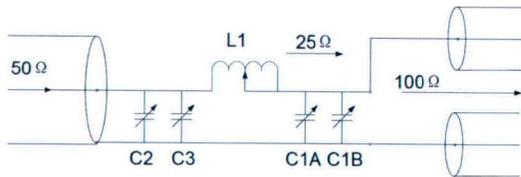


图4 ATU调谐单元原理图

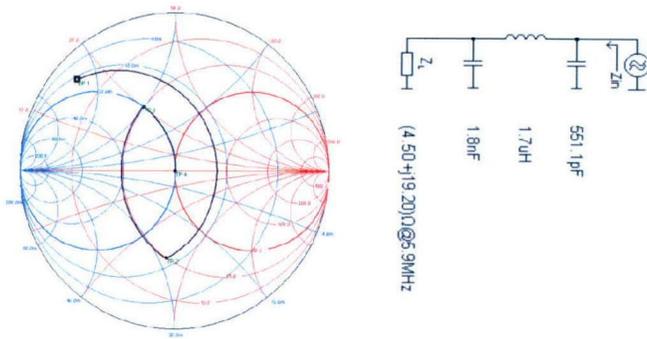


图5 Smith圆图及π网络各元件匹配值 (Z<sub>0</sub>=50Ω)

表3 天线LB2/2/0.5组态 6 MHz 频段调谐预置表

序号	25Ω 测量值			ATU 各器件对应值		
	F [MHz]	R (Ω)	X (Ω)	C1A+C1B (pF)	L1 (uH)	C2+C3 (pF)
1	5.9	4.5	19.2	1800	1.7	551.6
2	5.93	4.9	19.9	1800	1.7	538.5
3	5.96	5.1	20.5	1700	1.7	536.6
4	5.99	5.4	21	1700	1.7	532.6
5	6.02	5.3	21.5	1600	1.7	538.3
6	6.05	5.5	22.5	1600	1.8	537.8
7	6.08	6.1	23.2	1500	1.7	541.1
8	6.1	6.3	23.4	1500	1.7	533.7
9	6.14	6.9	24.2	1500	1.7	531.7
10	6.17	7.3	25	1400	1.7	532
11	6.2	7.8	25.5	1400	1.7	521
12	6.23	8.4	26.1	1300	1.7	515.9
13	6.26	9.1	26.6	1300	1.6	517.6
14	6.29	9.8	27.1	1300	1.6	527.7
15	6.295	10.1	27.3	1300	1.6	513.2



表4 LB2/2/0.5-6MHz子区域调谐前后阻抗列表

F[MHz]	组态 HR 2/2/0.5 6 MHz 频段调谐后阻抗测量值					频率范围[MHz]
	平转 25 端输入		天线 50W 端输入阻抗			
	R( $\Omega$ )	X( $\Omega$ )	R( $\Omega$ )	X( $\Omega$ )	VSWR	
5.90	4.5	19.2	49.49	2.13	1.05	5.870~5.900
5.93	4.9	19.9	50.67	-1.35	1.03	5.901~5.930
5.96	5.1	20.5	50.50	-1.28	1.03	5.931~5.960
5.99	5.4	21	49.33	-1.27	1.03	5.961~5.990
6.02	5.3	21.5	51.15	-0.77	1.03	5.991~6.020
6.05	5.5	22.5	50.36	-1.10	1.02	6.021~6.080
6.08	6.1	23.2	49.76	-0.87	1.02	6.081~6.100
6.10	6.3	23.4	49.72	-0.74	1.02	6.101~6.140
6.14	6.9	24.2	49.81	-0.60	1.01	6.141~6.170
6.17	7.3	25	49.88	-0.69	1.01	6.171~6.200
6.20	7.8	25.5	49.88	-0.74	1.02	6.201~6.230
6.23	8.4	26.1	49.74	-0.88	1.02	6.231~6.260
6.26	9.1	26.6	49.87	-0.58	1.01	6.261~6.290
6.29	9.8	27.1	49.89	-0.62	1.01	6.291~6.295

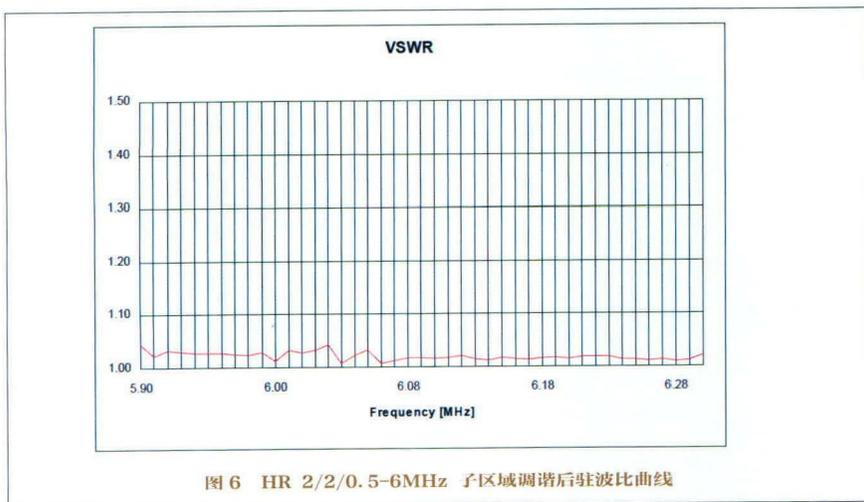


图6 HR 2/2/0.5-6MHz 子区域调谐后驻波比曲线

段对应一组阻抗匹配的 ATU 各器件预设值, 累积起来, 就是完整的天线阻抗匹配系统。匹配前后的天线阻抗

及驻波比见表 4。

表 4 所测阻抗经过 ATU 调谐后的 HR 2/2/0.5 组态 6 MHz 频段调

谐前后阻抗测量值列表。从表 4 中可以看出通过调谐该子频段驻波比最大值仅有 1.05, 该天线全部子频段调整完成后, 最终在 5.9~26.1MHz 范围内可达到所有组态所有频率 VSWR 小于 1.2, 如图 6 所示。

实际操作中, 当我们选择天线工作组态和频率后, 控制系统调整组态开关到预设组态位置, 同时将所选择的频率预设值与各元件的当前状态值做比较, 计算出相应的调谐元件 L1、C1、C2 及 C3 的调整量, 然后启动调谐马达, 调整调谐元件到达预设位置。天线即完成自动调谐和匹配。

## 5 结论

折合偶极子作为转动天线重要组成部分, 由于其特殊的刚性结构和其馈电电流等幅同相的特性, 使整座天线结构更加稳固, 接地更加可靠, 加上高效的阻抗匹配, 为该类天线的安全稳定运行和高效的传输发射奠定了坚实的基础, 对同类天线设计、建设和使用具有重要的参考和借鉴意义。RTI

## 上接第 107 页

符号率 18000kbit/s, 极化方式垂直, 音频 PID 码 92。

(4) 解调出都市之声在两颗卫星上的音频节目后, 必须监听对比两套节目源的音质和时延, 发现中星 6B 比亚太 6 号节目快了将近 1s, 音质立体声, 信号流畅, 可以播出。

(5) 与本台节目监制协调和确认节目内容。节目具体内容以及转播流程可交给节目部门处理, 由监制打电

话到中央人民广播电台都市之声总控室确认节目源, 填写转播程序表。技术人员做好音频信号接入调音台、信号电平调整、主备通道切换设置等技术细节, 并且在值班本上记录好接收的卫星节目各项参数以及信号跳接等关键信息, 以方便其他值班人员跟进。

## 4 结束语

通过上面的简单介绍, 了解到

卫星接收技术是一项系统技术, 技术复杂度较高, 涉及到了信号处理、通信、电子工程等众多领域。而对于机房的技术人员来说, 扎实做好基层业务, 注重技术细节, 在平常工作中积累经验才是最重要的。在现阶段, 各地方广播电台、中波台、小调频站仍然是通过卫星接收的方式, 接收广播信号, 然后对外转播。希望本文能对一线播出同行们有所帮助。RTI