

# 特高频继电保护

华东电力设计院 王春生  
上海继电器厂 罗益万

## 一、前言

在党中央抓纲治国战略决策的指引下，全国掀起了农业学大寨、工业学大庆的群众运动，工农业生产和建设得到了迅速的发展，也促进了电力工业以更快的建设速度来适应社会主义事业的需要。由于负荷的增长出现了许多大容量的发电厂和变电所，原有的长距离输电线路陆续地被断开并接入新建的发电厂或变电所，尤其在城市的周围已出现了许多各种电压等级的短线路。这些短线路已是密集成群，并且随着形势的发展短线路也在不断地增加，这种情况在全国各个电网中已是十分普遍。

短线路的不断出现，使在这些线路上装设主保护和后备保护时遇到了许多新的问题。目前各制造厂生产的许多保护装置，例如距离保护、零序电流保护、高频保护装置等大都适用于中长线路。尤其是阶梯式保护装置用在短线路上时，整定配合上非常困难，往往是灵敏度很低、动作时间很长，远远不能满足系统稳定对切除故障时间的要求。有些短线路是由电力电缆组成，或电力电缆与架空线路混合组成，使电力线载波的高频保护装置不能得到应用。

以华东地区为例，在220千伏短线路环网上采取了加强主保护和简化后备保护的措施，在线路上装设两套纵联差动保护装置作为主保护，其中一套为整流型纵差保护，另一套为晶体管式纵差保护装置。在投入运行的两年多时间内，在发生外部短路时由于线路中流有很大的短路电流，使导引电缆中感应出很高的电压，使导引电缆被击穿、保护装置受到损坏，造成保护装置的误动，扩大了电网的事故。因此在采取各种反事故措施的同时，有必要研制一些新的保护装置以适应短线路的需要。所研制的特高频继电保护就是适用于作为短线路主保护的一种方式。

## 二、特高频继电保护的应用和特点

由于电力系统继电保护、运动和通信技术的不断发展，利用电力线载波的高频通道在频率分配上越来越显得拥挤，因此五十年代以来许多国家开始在电力系统中，利用微波通道作为继电保护、运动和通讯设备的通道。由于微波通道具有较宽的频带，可适应多路通讯或传送大容量讯息的要求，运行实践表明通道的工作十分可靠，因此微波通道已得到日益广泛的应用。如特高频通道用于短线路时，由于不需增设中继站，通道的设

备可以简化，也便于实现。

无线电超短波按照波长可以分为几个波段：波长在10~1米（频率为30~300兆赫）称为米波；波长在1米~1分米（频率为300~3000兆赫）称为分米波；波长在1分米~1厘米（频率为3000~30000兆赫）称为厘米波。通常将30~300兆赫的频段称为甚高频（VHF），300~3000兆赫的频段称为特高频（UHF）。1000~3000兆赫的频段又称为微波。由于电磁波的频率很高，对电离层已不起反射作用，只能在“视线”范围的自由空间中传播。因此超短波的传播一般只限于视距范围之内，当架设一定高度的天线时，传播距离约为40~60公里。如两个变电所之间的距离超过上述距离时，需要增设中继站转送信号。

利用特高频通道作为继电保护的通道具有下列优点：

1. 特高频通道不需装设与输电线路直接相连的高频加工设备，在检修有关高压电器时，不需要将特高频保护退出运行。
2. 特高频通道具有较宽的频带，可传送多路信号或实现各相电流的相位比较等。
3. 特高频通道的工作频率较高，与输电线路没有直接的联系，受到的干扰较小。
4. 特高频通道可与各种保护方式配合，也可加设在现有的保护装置上来提高动作的性能。

特高频通道存在的问题是：

1. 当变电所之间的距离超过50公里左右时，应增设中继站。
2. 电波在大气中传播时存在着折射和反射等现象，使信号可能产生衰落现象。当工作频率较高、线路较短时衰落现象较不严重。

国外对特高频继电保护使用较为广泛。五十年代初期由于电力线载波通道越来越拥挤，美国邦奈维尔（Bonneville）电力公司报道了将微波通道用于电力系统的情况。五十年代后期时不少电力公司已将微波通道用于继电保护、远动和自动控制等方面。随着电网的发展，微波通道还扩大到用于控制频率、报警、向计算机传送高速数据等方面。据报道到1970年时，美国采用微波继电保护的线路总长为12748英里，其中最短线路为1.14英里，最长为224英里。继电保护方式中73%的用户采用允许跳闸方式。直接跳闸方式较广泛地用于高压侧不装设断路器的变电所中，以及作为断路器失灵的后备保护。60%的用户报告，正在将微波通道用于后备保护，以在断路器失灵时用以切除故障。

美国微波通道较多采取工作频率为6~8千兆赫，其次是2千兆赫，少数采用900兆赫。多数通道与语音通道复用，采用固体电路的收发讯设备，一般发射功率为1瓦，收讯灵敏度低于-75分贝毫瓦。线路长度较长时采用中继站转送信号。为了提高工作可靠性，较多用户使用了热备用装置，一部分用户采用冷备用装置或不采用备用装置。大部分用户报告工作的可靠性在99%~99.98%。70年以后可能是因微波通道使用较为普遍，报道较为少见。

苏联在六十年代初已注意到将特高频通道用于继电保护的情况，但实际使用较晚，70年左右才将特高频通道用于方向比较式保护。77年公开报道将特高频通道用于110~220千伏线路保护装置中。采用 $\phi M10\sim 164$ 型收发讯机，工作频率为162~168兆赫的甚

高频段，发讯功率为8.6瓦。研制了收发讯机与保护装置之间的接口设备，一种接口设备可与距离或方向电流保护相配合以作为允许跳闸式，另一种接口设备可与  $\Delta\Phi 3-2$  型相差动保护屏相配合。允许跳闸式中正常情况下利用一个音频信号进行通道监视，故障时切换到另一音频信号作为允许跳闸信号。在特高频相差动保护中，正常时通道中也传送监视信号。当收不到监视信号或闭锁信号时说明信号有衰落或设备有故障，保护装置退出工作。当监视信号或闭锁信号中任一个恢复时，保护装置重新投入工作。

日本在早期的高频保护中，方向比较和相位比较两种方式都有应用。因很多情况下日本采用同杆架设的双回线路，在发生两回线路上的多重故障时，方向比较式保护在选择故障相方面存在着问题。对于相位比较方式由于需采用宽频带通道，使用上受到一定的限制，但在六十年代中期后日本广泛采用了微波通道，这些问题可得完全的解决。尤其对于500千伏线路，主保护方式基本上采用相位比较方式。

日本的相位比较方式保护中，不少情况下采用比较各相电流相位的方式。在通道中与通信等复用情况较多，继电保护信号的传送有的也采用了群频、数字传送等方式。在电压等级高的线路保护装置中又采用了经常监视和自动检测方式。总的来说，接线较为复杂。

在华东电网中曾利用一套由  $WT-004$  型电子管通信机来构成继电保护装置的甚高频通道，装设在一回220千伏线路上。保护方式为由距离保护和零序方向电流保护组成的允许跳闸式，收发讯机工作频率为169和172.5兆赫，采用三单元八木天线，发讯功率为15~20瓦。自1965年该保护装置投入运行后，在发生多次外部故障时收发讯机都能正确发讯和收讯，运行情况是良好的。 $WT-004$  型机主要用作为甚高频段的通讯机，体积较大，该产品早已停产。

### 三、特高频继电保护的方式

特高频继电保护是利用特高频通道来传送信号，以实现全线路的瞬动保护，因此与一般的高频保护相同，也可分为下列几种方式。

#### 1. 传送直接跳闸信号方式

图1示出传送直接跳闸信号的保护方式示意图。在被保护线路上发生故障时，A侧保护装置的第一段  $Z_1$  动作，接点  $Z_1$  闭合后跳开本侧的断路器，另一接点  $Z_1$  起动作发讯机。当线路对侧（B侧）收到A侧的直接跳闸信号时，B侧的收讯继电器  $S \times J$  动作，接点  $S \times J$  闭合后跳开B侧的断路器。

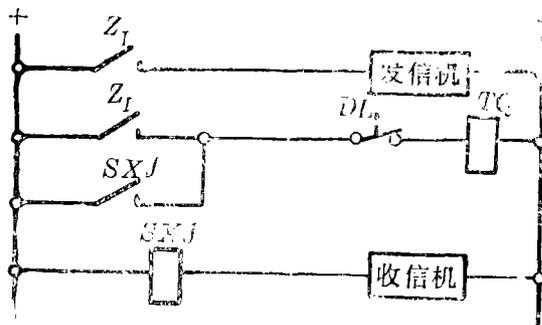


图1 传送直接跳闸信号方式

在发生外部短路时，由于两侧保

护装置的第一段都不动作，因此保护装置不反应于外部故障。

这种保护方式的接线比较简单，但当收讯继电器动作时将直接跳闸，因此要求特高频通道具有较高的抗干扰能力。

### 2. 传送允许跳闸信号方式

图 2 示出传送允许跳闸信号的保护方式示意图。在被保护线路发生故障时，如短路发生在保护装置第一段  $Z_I$  的动作范围内，接点  $Z_I$  可直接动作于跳闸。但不论故障点是否在第二段保护范围内，能保护线路全长的两侧保护装置第二段  $Z_{II}$  总是可以动作，起动本侧的发讯机。两侧的收讯机在收到对侧送来的允许跳闸信号时，收讯继电器  $SXJ$  动作。当接点  $Z_{II}$  和  $SXJ$  都闭合时表示故障点发生在本线路范围内，两侧保护装置瞬时地跳开本侧断路器。

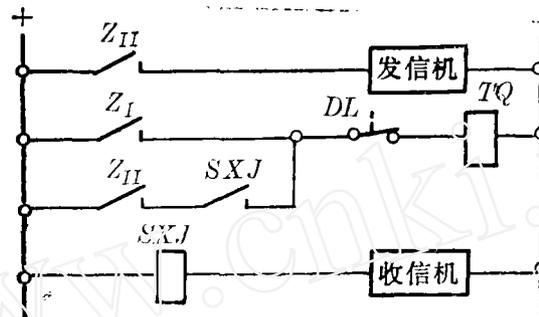


图 2 传送允许跳闸信号方式

如发生靠近  $B$  侧的外部短路时， $B$  侧的  $Z_{II}$  不动作， $B$  侧发讯机不发讯。 $A$  侧保护装置的第二段虽可动作，但由于收不到  $B$  侧送来的允许跳闸信号， $A$  侧的瞬时跳闸回路不动作。但  $A$  侧保护装置的带时限跳闸回路仍可起动，可作为相邻线路的后备保护。

可也由保护装置的第一段起动发讯机，使送出允许跳闸信号。

由于本保护方式中，接点  $Z_{II}$  与  $SXJ$  串联后再起动瞬时跳闸回路，因此可具有较高的可靠性。

### 3. 方向比较方式

在线路两侧各装设两个方向元件  $P_1$  和  $P_2$ ，示意图如图 3 所示。其中  $P_1$  为正向元件，当短路功率自母线流向线路时动作； $P_2$  为反向元件，当短路功率自线路流向母线时动作。在发生外部短路（图 3 中  $K_2$  点）时， $B$  侧的反向元件  $P_2$  动作，起动发讯机使发出连续的高频闭锁信号。 $A$  侧收到  $B$  侧的闭锁信号时  $A$  侧的正向元件  $P_1$  被闭锁，保护装置不动作。由于  $B$  侧的  $P_1$  元件不动作， $B$  侧保护装置不动作。

在被保护线路发生短路时，两侧的  $P_1$  元件都动作，接通停讯继电器  $TXJ$ ，发讯机被停讯， $P_2$  元件都不动作，因此两侧保护装置动作于跳闸。

为使在发生外部短路时保护装置能可靠地被闭锁， $P_2$  元件的灵敏度应高于  $P_1$  元件。

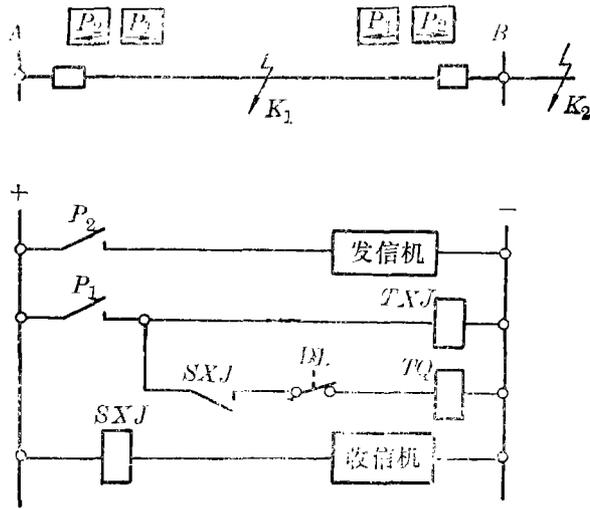


图3 方向比较方式

#### 4. 相位比较方式

利用两侧的工频电流来操作发讯机，在电流的正半周时使发讯机发出方块波高频信号。在正常运行或外部短路时，一侧的电流自母线流向线路，另一侧则自线路流向母线。在相位比较回路中本侧的方块信号与对侧来的方块信号在相位上相差 $180^\circ$ ，方块信号互相填塞，相位比较元件不动作。当发生内部故障时，本侧和对侧来的方块信号在相位上相近同相，方块波中出现了空隙，当空隙大于一定宽度时相位比较元件动作，保护装置动作于跳闸。

在电力线载波的高频保护中，方向比较式或相位比较式使用得较多。这两种方式传送的是高频闭锁信号。在发生外部故障时，可沿被保护线路可靠地传送闭锁信号，使保护装置得到闭锁。而在发生内部故障时，通道可能受到短路故障的破坏，但此时并不需要传送闭锁信号。而采用传送允许跳闸信号方式时，则在线路发生内部短路时需要沿通道可靠地传送信号。对于相地制的高频通道，高频电流的传送可分为相间波和地返波两部分，地返波的衰减要比相间波大得多，高频电流主要依靠相间波来传送。除了线路上发生三相金属性接地短路外，高频信号一般可通过故障点传送到对侧。但此时将增加附加的衰减，必须加大发讯机的输出功率或降低收讯电平，因此通道的可靠性将受到一定的影响。

对于特高频保护，比较有利的是采用传送直接跳闸信号或允许跳闸信号的方式。特高频通道利用空间波传播信号，信号的传送与线路的短路故障无关。这两种保护方式的接线比较简单，并且特高频保护可与阶梯特性的后备保护结合起来。此外由于无线电波在大气中传播时，受到折射、反射等影响可能使信号发生起伏，即衰落现象。衰落的发生是随机的，通常发讯机的工作频率越高时，衰落的持续时间也短些。对于传送直接的或允许跳闸信号方式，最不利情况下出现深衰落时，仅使跳闸时间稍稍延迟，但不会产

生误动作。但对于传送闭锁信号的保护方式，当发生外部短路时，即使发生信号的深衰落，仍必须将闭锁信号传送到对侧，否则可能引起保护装置的误动作。

比较了传送直接跳闸信号方式和允许跳闸信号方式后，可以看出在后一情况下，由于在收讯继电器  $SXJ$  的接点中串接了保护装置的接点，允许跳闸信号方式具有较高的可靠性。这种保护方式可与各种带方向性保护装置相配合，无论是距离保护、零序方向电流保护或方向电流、电压保护等均可适用，也可在现有的保护装置上加设收发讯机来实现全线联动的保护装置，在使用上比较灵活。

特高频相差保护也是一种使用得较为广泛的保护方式。这是因为在采用方向阻抗元件作为发讯机的起动元件时，由于弧光电阻、铁塔接地电阻等的阻抗值往往可与短线路的阻抗值相比拟，使方向阻抗元件的动作不可靠。而相位比较式保护只反应于两侧电流的相位，受弧光电阻等的影响较小，尤其在短线路上使用时具有一定的优越性。

前面已经提过相位比较方式中，目前采用的有比较复合电流  $I_1 + KI_2$  的相位方式和比较各相电流  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  的相位方式。比较  $I_1 + KI_2$  相位方式中，沿通道传送的只是一个电气量，电路稍为简单。比较电流  $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  相位方式中需要传送三个电气量，对于电力线载波这点是难于实现的，但对于具有宽频带的特高频通道来说，这是易于解决的。在采用单相重合闸的线路上，阻抗选相元件易于受到弧光电阻的影响而动作不可靠，而比较各相电流相位的方式可具有很好的选相能力。在长时间或短时间的两相运行过程中，如未断开相上再发生各种故障时，比较各相电流的相位比较元件仍有很好的判别故障的能力。因此这种方式可用于 220 千伏线路以及同杆架设的双回线上发生多重故障的情况。

目前阶段应用在华东地区 220 千伏线路上的特高频继电保护，是采用  $PLH-13$  型保护屏与特高频收发讯机相配合，采取传送允许跳闸信号方式。下阶段再研制相位比较方式。

$PLH-13$  型保护屏由两段式相间距离保护和三段式零序方向电流保护装置组成，用于华东地区 220 千伏短线路上时，距离保护第一段的保护范围太短，整定有困难，因此距离保护按第二、三段方式应用。为便于说明，下面只介绍  $PLH-13$  型保护屏与特高频收发讯机配合的部分，图 4 示出相应的接线图。

图中接点  $ZKZ$  和  $TTJ$  相应为距离保护和方向零序电流保护第二段的接点， $STJ$  为母线保护接通三相跳闸的接点。正常情况下中间继电器  $GQJ$  经接点  $STJ$ 、 $TTJ$ 、 $ZKZ$  和  $GQJ_1$  被接通，延时返回的中间继电器  $GFJ$  由接点  $GQJ_2$  接通。当线路发生故障时，常闭接点  $STJ$ 、 $TTJ$  或  $ZKZ$  中任一个将断开，继电器  $GQJ$  返回并以其接点  $GQJ_1$  断开自保持回路。常闭接点  $GQJ_2$  返回后起动特高频发讯机。如对侧发讯机被起动、本侧收讯机收到对侧送来的允许跳闸信号时，收讯继电器的接点  $SXJ$  闭合。当常开接点  $ZKZ$  或  $TTJ$  也闭合时，出口中间继电器  $GCJ$  即被接通，接点  $GCJ_1$  闭合后发生跳闸脉冲。

考虑到阻抗元件受弧光电阻的影响，可能使两侧保护装置产生相继动作，先动作一侧的保护装置在断开断路器后将返回，发讯机被停讯，对侧如收不到允许跳闸信号时将

使保护装置拒绝动作。因此加设了延时返回的中间继电器  $GFJ$ ，当继电器  $GQJ$  返回时， $GFJ$  也返回，接点  $GFJ_2$  返回时带有 0.4 秒的延时，可使本侧保护装置动作时将起动发讯的时间延长 0.4 秒，这一时限足以使对侧保护装置可靠跳闸。

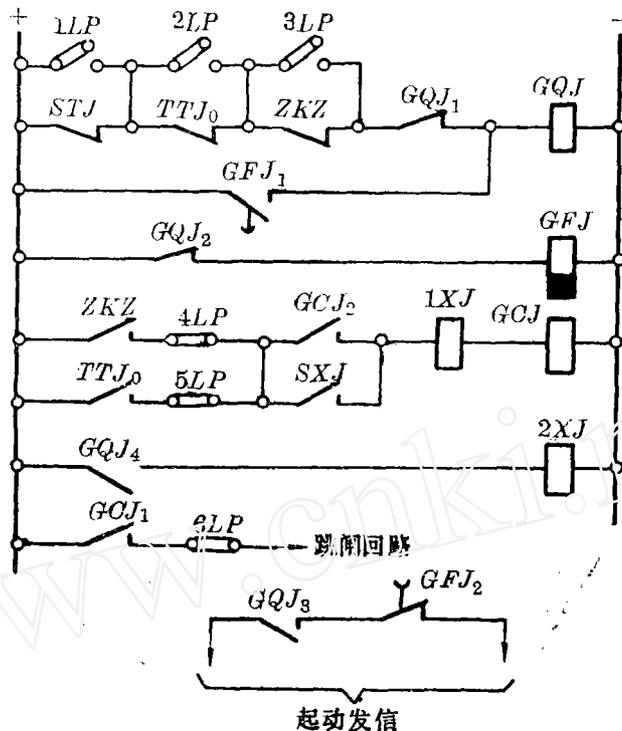


图 4 特高频距离零序保护

为使一套保护装置检修时不影响特高频保护的运行，设有连接片  $1LP \sim 3LP$ 。正常时连接片处于打开位置，任一套保护装置退出运行时可将相应的连接片合上。当发生母线故障并断路器失灵时，为使对侧的特高频保护可被起动，将故障切除，接入了母线保护三相跳闸继电器的常闭接点  $STJ$ 。当接点  $STJ$  打开时本侧发讯机即被起动，向对侧送出允许跳闸信号。

#### 四、工作频率的选择

特高频继电保护的工作频率可选用超短波的各个频段，目前采用的自甚高频到微波波段都有。频率的选用应根据采用的电子器件或设备条件、天馈线条件，与运动、通信等复用条件来确定。

当特高频通道用于城市周围的短线路上时，应考虑城市干扰，如各种车辆的火花，电器操作，雷达等对通道的干扰作用。图 5 示出各种干扰电平与频率的关系曲线。从图中可看出，频率越高时受到干扰的影响越小。一般情况下工作频率高于 300 兆赫时，可认

为干扰的影响较小。

如工作频率较低时，发讯机的功率放大部  
分可应用半导体器体来组成，可使电路简单，  
消耗功率小。到七十年代初期，功率超过20瓦  
以上的大功率高频晶体管的最高工作频率，大  
约可做到470兆赫左右。如选用更高的工作频  
率时，一般末级发射管需选用速调管、行波管  
等电真空器件。这些管子的工作电压都在几百  
伏或一千伏以上，为此必须设置单独电源回  
路。

当工作频率用在甚高频频段时，由于波长  
较长，通常采用多单元的八木天线，这种天线  
的增益较低，约5~7分贝。而当工作频率在  
2千兆赫以上时，一般都采用带抛物面反射器  
的天线，这种天线有较高增益，可达35~40分  
贝。如天线增益较高，可在同样收电平的条件  
下降低发讯机的输出功率，便于发讯机的制  
作。

苏联在七十年代开始研制的用于继电保护的  
甚高频收发讯机，工作频率为162~168兆赫，  
发讯机功率输出部分由电子管组成。如前所  
述，甚高频段所用的天线增益较低，干扰电  
平相应地较高。

美国用于特高频继电保护通道的工作频率  
的种类很多，有些公司开始采用900兆赫，  
2千兆赫等。许多公司将继电保护与通信合  
用同一通道。随着通信路数的增加，以及自  
动和远动技术的发展，通道中需传送越来越  
多的数据和信息，频段较低时通频带较窄，  
不能满足电网的要求，因此逐步地趋向于采  
用6~8千兆赫。选用比8千兆赫更高的频  
段时，考虑到传播的衰耗加大，并易于受到  
雨、雪、雾等影响，对通道的可靠工作反为  
不利。日本的情况与美国比较接近。

华东地区采用的特高频通道的工作频率，  
一侧发讯为450兆赫，另一侧为460兆赫。  
这是因为目前采用的国产高频大功率晶体  
管，可使发讯机最大输出功率达10瓦左右，  
此外制造厂对该频段的测试仪器比较齐全，  
有利于研制和调试工作的进行。并且该频  
率已经有关部门批准，可供民用的无线电  
台或收发讯机使用。

如该频段的产品已经成熟时，则可进一步  
研制工作频率更高的收发讯机。

## 五、特高频发讯机

特高频发讯机的方框图如图6所示，一  
侧发讯频率为450兆赫另一侧为460兆赫，  
输出功率为5~10瓦。

发讯机中利用石英晶体振荡器产生37.5  
兆赫信号，由于石英晶体具有 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 的

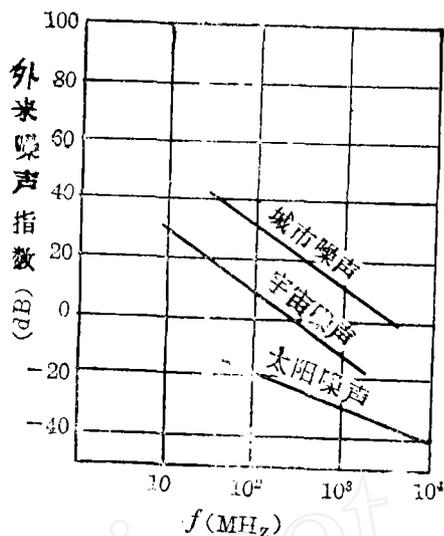


图5 干扰电平与频率关系曲线

频率稳定度，因此可得到高稳定频率的信号。为提高特高频继电保护的可靠性，本产品采用经常发讯的方式，以对特高频通道进行连续的监视。监视信号是由6千赫石英晶体振荡器产生的音频信号，经低频放大后对37.5兆赫信号进行频率调制。37.5兆赫信号经放大、两次二倍频和一次三倍频后送入功率放大器。功率放大器输出功率可达5~10瓦，经环流器、同轴电缆馈送到天线。环流器用以吸收天线侧的反射功率，防止由于电波的反射而引起电子器件的损坏。

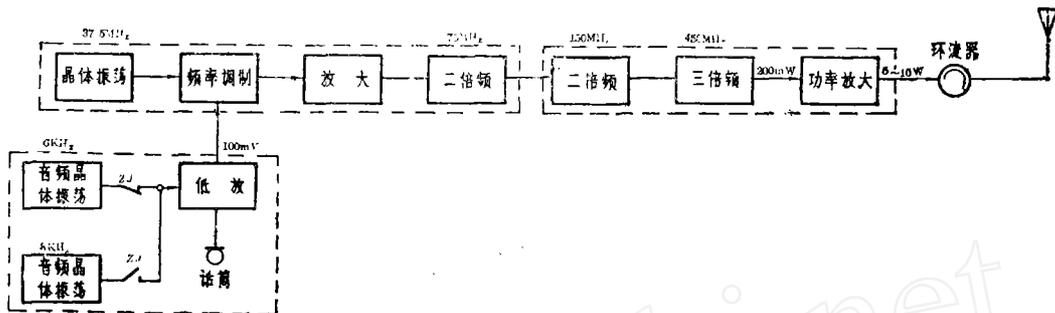


图6 特高频发信机方框图

当线路发生故障时保护装置将动作，接通发讯机中切换继电器  $ZJ$ ， $ZJ$  动作后将6千赫回路断开，接入8千赫音频振荡回路。利用8千赫移频信号对37.5兆赫进行频率调制，作为使对侧允许跳闸的信号。由于正常情况下利用6千赫信号连续监视通道，而故障时利用8千赫移频信号使对侧允许跳闸，因此特高频通道可有高的可靠性。

正常情况下发出监视信号时，发讯机上设有表示正常工作的灯光信号。面板上装有表头，按下琴键按钮可测试发讯机各环节的工作状态。如发讯机发生故障时，相应的继电器可发出音响警报信号。低放级设有话筒插口，供试验收发讯机和调整天线时作为临时通话用。

发讯机的技术指标为：

1. 正常频率：A侧450兆赫，B侧460兆赫。
2. 输出功率：5~10瓦。
3. 最小作用距离：全气候条件下不小于20公里。
4. 调制方式：正常时两侧6千赫调频。  
故障时A侧8千赫调频。  
B侧10千赫调频。
5. 工作方式：连续运行，双工、双天线。
6. 最大频偏： $\pm 15$ 千赫。
7. 天馈线：天线为角形反射器天线，馈线为 $50\ \Omega$ 同轴电缆。
8. 天线架设方式：根据作用距离，一般约为20~30米高，收发天线可同杆架设。
9. 工作温度： $-10^{\circ}\sim +50^{\circ}\text{C}$ 。

## 六、特高频收讯机

特高频收讯机的方框图如图 7 所示。

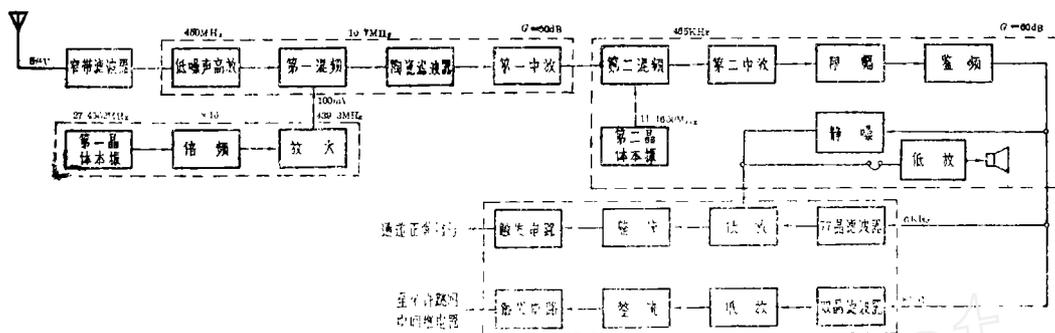


图 7 特高频收信机方框图

由接收天线来的高频信号进入由谐振腔组成的窄带滤波器，滤波器的通频带为1%，可使收讯机只接收由对侧发讯机送来的信号。为提高信噪比，第一级采用低噪声放大器。由第一本机石英晶体振荡器产生的27.4562兆赫信号，经16倍频和放大后成为439.3兆赫信号。本振信号注入第一混频级，差频后产生10.7兆赫第一中频信号。10.7兆赫信号通过陶瓷滤波器后可抑制通频带以外的干扰信号。中频信号经放大后送入第二混频级。由第二本机石英晶体振荡器产生的11.165兆赫信号注入第二混频级，经差频后产生465千赫第二中频信号。465千赫信号经中放和限幅后接到鉴频器。在鉴频器中将监视通道的6千赫信号滤出，6千赫信号再接入双晶滤波器。双晶滤波器是由6千赫石英晶体组成的窄带滤波器，通频带可做到几十赫左右。由于通频带极窄，可使进入收讯机的千赫扰信号减到最小。6千赫信号经低放、整流后起电触发电路，使发出通道正常信号。当通道故障时触发电路返回，可发生通道故障信号。

当线路发生故障时对侧发讯机发出8千赫移频讯号，本侧收讯机的鉴频器输出8千赫信号，经低放和整流后起电触发电路，使收讯继电器SXJ动作，准备好继电保护的跳闸回路。

发讯机和收讯机各装在一个箱子内，机器中各个插件均放在黄铜的屏蔽盒内，盒与盒之间利用同轴电缆接头连接。收讯机面板上同样装有表头和琴键按钮，可检测各环节的工作状态。收讯机中设有扬声器插口，可供调试时接收语音用。

收讯机的技术指标为：

1. 窄带滤波器：通带1% ( $\pm 0.5\%$ )，通带插入损耗 $< 3$ 分贝。  
阻带2% ( $\pm 1\%$ )，阻带衰减 $> 80$ 分贝，  
驻波比 $< 1.30$ ，允许两只滤波器串联。
2. 低噪声高放：电压增益不小于20分贝。

3. 第一中放：增益30分贝，输入20微伏，输出>100微伏。
4. 第二中放：增益60分贝，输入0.1毫伏，输出>0.1伏。
5. 第一晶体本振：输出100毫伏，频率稳定度 $10^{-6}$ 。
6. 双晶滤波器：通带0.5%，阻带>50分贝。

## 七、天馈线

在变电所中天线一般装在离发讯机十几米到几十米的地方，天线与收发讯机之间需用馈线连接。特高频通道中采用同轴线或波导作为馈线。一般在分米波段（ $f < 3000$ 兆赫）多采用软同轴线作为馈线，在厘米波段（ $f > 3000$ 兆赫），因同轴线损耗大，采用波导作为馈线。

同轴线的波阻抗一般有 $50\ \Omega$ 和 $75\ \Omega$ 两种。当频率增高、电缆长度增加时，同轴线上的损耗也加大，因此天线应装设在离收发讯机尽可能近的地方。本特高频继电保护中采用 $50\ \Omega$ 的同轴线作为馈线。

发射天线的作用是有效地将发讯机输出的高频信号沿给定方向辐射出去，成为电磁波。电磁波沿一定路径到达接收侧，利用接收天线将电波接收下来。在特高频通道中希望采用方向性强的定向天线，使可用较小的发射功率在给定方向产生足够的场强，同时减少对其他方向产生不必要的干扰。

天线的方向性可用方向性图表示，如图8所示。图中向往方向代表辐射方向，向往的长短代表辐射的强度。方向性图中包括许多叶瓣，其中最大辐射方向的叶瓣称为主瓣，其他依次为第一副瓣、第二副瓣和后瓣等。天线辐射的集中程度可用主瓣宽度表示，它是辐射强度为最大值一半的向往之间的夹角，即图8中的角 $2\theta_{0.5}$ 。主瓣宽度越小，即角 $\theta_{0.5}$ 越小，天线辐射越集中，天线的增益越高。

天线的性能常以天线的增益 $G$ 表示。天线增益的定义为在相同输入功率条件下，某天线产生于某点的电场强度的平方 $E^2$ ，与理想的无方向性天线在同一点产生的电场强度的平方 $E_0^2$ 的比值，即增益 $G$ 为：

$$G = \frac{E^2}{E_0^2}$$

由于辐射功率与电场强度平方成正比，天线增益也可这样确定，即在某点产生相等电场强度的条件下，无方向性天线的输入功率 $P_0$ 与某天线的输入功率 $P_1$ 的比值，称为该天线在该点方向的增益，即：

$$G = \frac{P_0}{P_1}$$

因天线在不同方向的辐射电场强度不相等，天线增益是指最大辐射方向的增益。

天线增益值常以分贝表示，即： $G_{\text{分贝}} = 10L_{0.100}$ 。

接收天线与发射天线的结构相同时，二者具有相同的方向性和增益等特性，因此不

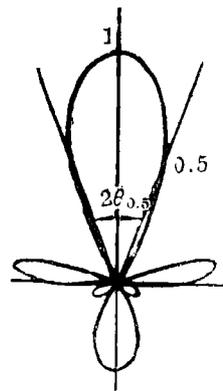


图8 天线的方向性图

需另行讨论。在目前阶段中华东地区220千伏线路特高频通道采用发射和接收天线分开工作的方式，今后在研制了收发双工器后，可将发讯和收讯的功用合并在同一天线上。

甚高频波段的的天线通常采用八木天线，如图9所示。其中A为振子，R为反射器，D为定向器，反射器只有一根，定向器则可有多个。振子的长度约为 $\frac{\lambda}{2}$ ， $\lambda$ 为波长。反射器离振子的距离在 $(0.1\sim 0.25)\lambda$ 之间，长度约比振子长5~15%。定向器与振子，定向器之间的距离为 $(0.1\sim 0.34)\lambda$ ，长度比振子短5~10%。天线的元数越多，相当于天线越长，方向性图中的主瓣越窄。但元数增到一定数量后，角 $2\theta_{0.5}$ 的变化不大。

八木天线的优点是结构简单，体积不大，缺点是调整和匹配困难，天线增益不高，三单元八木天线的增益约为5~7分贝，五单元八木天线增益为8~10分贝。

对于450兆赫的频段，也可采用多单元的八木天线。考虑到进一步提高天线增益，产品中采用角形反射器天线，如图10所示。天线中利用由并排铝棒组成的反射面，电波经反射后可增加天线正方向的增益，使主瓣变窄。反射器的夹角为 $60^\circ$ 。两相邻铝棒之间的距离应小于 $0.1\lambda$ 。天线中每排的长度为0.8米，由24根铝棒组成，铝棒的长度为0.5米。馈线输入端还装有平衡——不平衡转换器。

这种天线的重量较轻，对风的阻力较小，天线增益约为13~14分贝。

当工作频率更高（2千兆赫以上）时，可采用增益高的抛物面反射器天线，这类天线的增益G为：

$$G = 4\pi \frac{A}{\lambda^2} \eta_1,$$

式中：A——抛物面的开口面积；

$\lambda$ ——波长；

$\eta_1$ ——抛物面口面利用系数，约为0.5~0.6。

例如用于华东电网微波通讯系统的工作频率为2千赫的抛物面天线（卡塞格林天线），直径为3.2米，增益可达35分贝左右。当增大发讯机输出功率一倍时，发讯电平仅增加3分贝。而输出功率的增加往往受到电子器件的限制，可见提高天线增益是有效的措施。

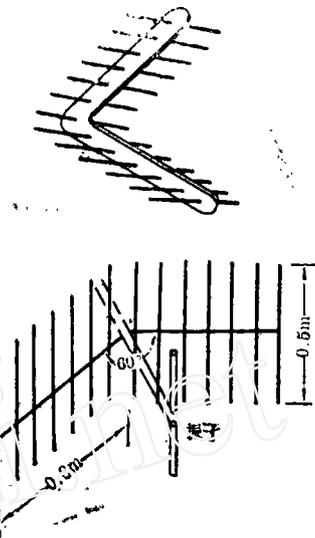


图9 五元八木天线

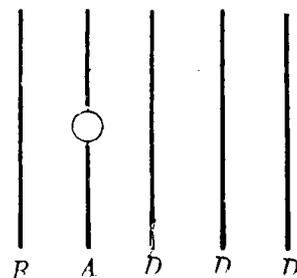


图10 角形反射器天线

面式天线常用的有抛物面天线和有双反射器的抛物面天线（卡塞格林天线）。抛物面天线由初级辐射器和抛物面反射器两部分组成。与探照灯相似，利用光学上的反射方法，将初级辐射器发出的球面波经反射器反射后，矫正为平面波，如图11所示。辐射器放置在抛物面AA的焦点位置F，从解析几何原理可知，从焦点到抛物面上任意点的电波，因入射角等于反射角，反射的电波必然与X轴相平行。由抛物面反射的是平行的波束，主瓣的宽度可以很窄，天线增益可达40分贝以上。

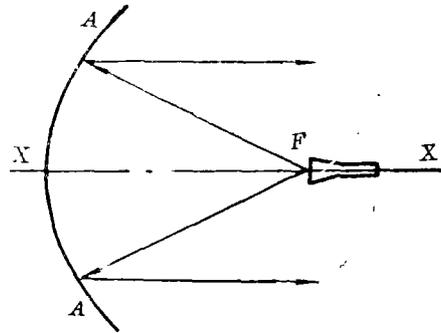


图11 抛物面天线

卡塞格林天线是一种双反射器系统，它利用两个反射面来形成波束。由初级辐射器（图12中的3）发出的射线首先射向一个旋转双曲面BB，经双曲面反射后入射于抛物面AA。将双曲面的焦点C放在抛物面的焦点F上，由几何光学可知，当辐射器发出的射线射到双曲面的任意点时，根据入射角等于反射角的原理，射向抛物面的所有射线都象是从它的焦点F发出的一样，经抛物面再反射的波束是平行的波束。

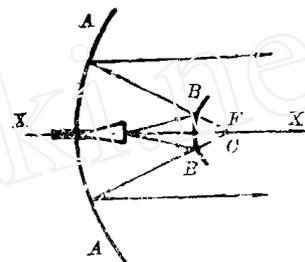


图12 卡塞格林天线

- 1—主反射器；
- 2—副反射器；
- 3—辐射器

卡塞格林原理首先用于光学天文望远镜上，近年来才用于超高频天线中。它的优点是辐射器的安装，调整比较方便。因此卡塞格林天线近年来应用得越来越普遍。天线增益可达40分贝以上。

由上可知，如今后进一步研制厘米波段（例如6~8千兆赫）的收发讯机时，则可利用尺寸小的天线取得高的增益。可在同样的收讯电平情况下减小发讯机的输出功率，便于发讯机的制作。

## 八、电波传播

米波段以及波长更短的电波是在大气层中直线传播的。由于地球表面是一个球面，当架设一定高度的天线时，电波可在视距范围内传播。两端之间的传播距离可由下式计算：

$$d = 4.12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}),$$

式中： $d$ ——传播距离，公里；

$h_1, h_2$ ——两侧天线的高度，米。

当传播距离大于50公里左右时，天线的高度将增加到不合理的程度。因此超过这一

距离时，应增设中继站。

假定发讯功率为 $P_t$ ，发讯天线为无方向性天线，功率 $P_t$ 经天线辐射后，能量将均匀地分布在以发讯天线为中心，半径为 $d$ 的球面上。因此离中心距离为 $d$ 点的单位面积的功率，即能流密度 $S$ 为：

$$S = \frac{P_t}{4\pi d^2}$$

由天线理论可求得无方向性天线的有效面积 $A_e$ 为：

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

收讯侧如用无方向性天线时接收到的功率 $P_r$ 为：

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

当收讯和发讯均为无方向性天线时，自由空间的传播衰耗 $L_s$ 为

$$L_s = \frac{P_t}{P_r} = \left( \frac{4\pi\lambda}{d} \right)^2$$

以分贝值表示时，上式为

$$\begin{aligned} L_s(d, f) &= 10 \text{Log} \frac{P_t}{P_r} = 10 \text{Log} \left( \frac{4\pi\lambda}{d} \right)^2 \\ &= 32.5 + 20 \text{Log} d + 20 \text{Log} f \end{aligned}$$

式中： $d$ ——收发天线间的距离，公里；

$f$ ——发讯机工作频率，兆赫。

当收发讯机都采用有方向性天线时，设发讯天线增益为 $G_t$ （分贝），收讯天线增益为 $G_r$ （分贝），发讯侧馈线衰耗为 $L_{ft}$ （分贝），收讯侧馈线衰耗为 $L_{fr}$ （分贝），自由空间传播衰耗为 $L_s$ （分贝），则收讯电平 $P_r$ 可由下式计算：

$$P_r \text{ (分贝毫瓦)} = P_t \text{ (分贝毫瓦)} + G_t + G_r - L_{ft} - L_{fr} - L_s$$

上述的自由空间传播是假定大气是完全均匀和不吸收的介质，也没有计及障碍和衰落等传播损耗。但可以先按这一方法计算接收电平，再考虑其他方面的影响。

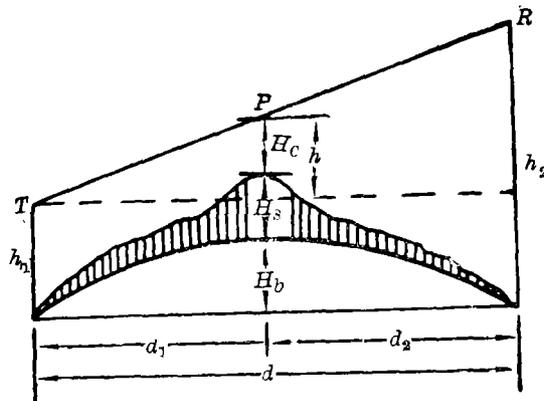


图13 传播余隙图

在勘测特高频通道时，可先画出两侧天线之间的地形剖面图，要注意地面上的山地或建筑物对电波起的阻挡作用。“视线”与地面最高凸起点之间的距离称为余隙 $H_c$ ， $H_c$ 的大小应满足一定的要求。当传播距离较长时应计及地球的凸起高度，图13示出传播余隙图。

图中 $h_1$ 、 $h_2$ 相应表示两侧天线的高度， $h = h_2 - h_1$ 表示天线高度之差， $d$ 表示两侧天线间的距离， $d_1$ 、 $d_2$ 相应表示最高凸起点离开两侧的距离， $H_0$ 表示地球凸起的高度， $H_s$ 表示山地或建筑物的高度。余隙 $H_c$ 值可自下式计算：

$$H_c = h_1 + (h_2 - h_1) \frac{d_1}{d} - \frac{d_1 d_2}{2a} - H_s。$$

式中 $a$ 为地球半径，可取为6370公里，在计算上式时各长度应采用同一单位。

当 $H_c \geq F_0$ 时称为开电路；

$0 < H_c < F_0$ 时称为半开电路；

$H_c < 0$ 称为闭电路。

式中： $F_0 = 0.577 \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}}$ ， $\lambda$ 为波长。

第一种情况有可能保证得到自由空间传播的信号强度，第二和第三种情况都不能得到保证，因此除特殊情况下应采用开电路。