

前言

射频电缆组件的正确选择除了频率范围，驻波比，插入损耗等因素外，还应考虑电缆的机械特性，使用环境 and 应用要求，另外，成本也是一个永远不变的因素。

在本文中，详细讨论了射频电缆的各种指标和性能，了解电缆的性能对于选择一条最佳的射频电缆组件是十分有益的。

射频电缆组件的基本选择原则

射频同轴电缆是用于传输射频和微波信号能量的。它是一种分布参数电路，其电长度是物理长度和传输速度的函数，这一点和低频电路有着本质的区别。

射频同轴电缆大致可分为半刚和半柔电缆、柔性编织电缆和波纹管电缆等几大类，不同的应用场合应选择不同类型的电缆。半刚和半柔电缆一般用于设备内部的互联；在测试和测量领域，应采用柔性电缆；波纹管电缆常用于通信基站天馈系统。

半刚性电缆

顾名思义，这种电缆不容易被轻易弯曲成型，其外导体是采用铝管或者铜管制成，其射频泄漏非常小（小于-120dB），在系统中造成的信号串扰可以忽略不计。这种电缆的无源互调特性也是非常理想的。如果要弯曲到某种形状，需要专用的成型机或者手工的模具来完成。如此麻烦的加工工艺换来的是非常稳定的性能，半刚性电缆采用固态的聚四氟乙烯材料作为填充介质，这种材料具有非常稳定的温度特性，尤其在高温条件下，具有非常良好的相位稳定性。

半刚性电缆的成本高于半柔性电缆，大量应用于各种射频和微波系统中。



图 1. 半刚性电缆组件

半柔性电缆

半柔性电缆是半刚性电缆的替代品，这种电缆的性能指标接近于半刚性电缆，而且可以手工成型。但是其稳定性比半刚性电缆略差些，由于其可以很容易的成型，同样的也容易变形，尤其在长期使用的情况下。



图 2. 半柔性电缆组件

柔性（编织）电缆

柔性电缆是一种“测试级”的电缆。相对于半刚性和半柔性的电缆，柔性电缆的成本十分昂贵，这是因为柔性电缆在设计时要顾及的因素更多。柔性电缆要易于多次弯曲而且还能保持性能，这是作为测试电缆的最基本要求。柔软和良好的电指标是一对矛盾，也是导致造价昂贵的主要原因。

柔性射频电缆组件的选择要同时考虑各种因素，而这些因素之间有些的相互矛盾的，如单股内导体的同轴电缆比多股的具有更低的插入损耗和弯曲时的幅度稳定性，但是相位稳定性能就不如后者。所以一条电缆组件的选择，除了频率范围，驻波比，插入损耗等因素外，还应考虑电缆的机械特性，使用环境 and 应用要求，另外，成本也是一个永远不变的因素。



图 3. 柔性(编织)电缆组件

特性阻抗

射频同轴电缆由内导体，介质，外导体和护套组成，见图 4。

“特性阻抗”是射频电缆，接头和射频电缆组件中最常提到的指标。最大功率传输，最小信号反射都取决于电缆的特性阻抗和系统中其它部件的匹配。如果阻抗完全匹配，则电缆的损耗只有传输线的衰减，而不存在反射损耗。电缆的特性阻抗 (Z_0) 与其内外导体的尺寸之比有关，同时也和填充介质的介电常数有关。由于射频能量传输的“趋肤效应”，与阻抗相关的重要尺寸是电缆内导体的外径 (d) 和外导体的内径 (D):

$$Z_0 (\Omega) = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \lg \frac{D}{d \times k_s}$$

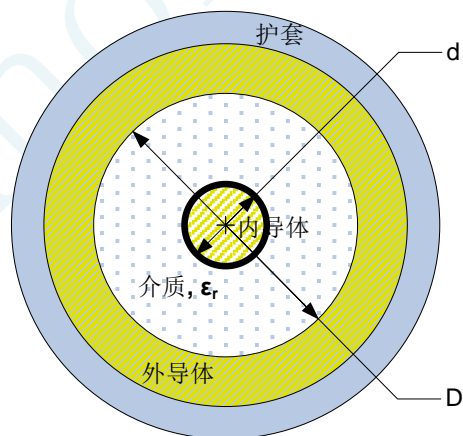


图 4. 射频同轴电缆的结构

式中， Z_0 为同轴电缆的特性阻抗 (Ω)， ϵ_r 为内部填充介质的相对介电常数， D 为外导体内径 (mm)， d 为内导体外径 (mm)。 k_s 为内导体系数，和内导体的结构有关：

单股内导体 — $k_s = 1$,

7 芯内导体 — $k_s = 0.939$,

19 芯内导体 — $k_s = 0.97$ 。

常见的射频同轴电缆绝大部分是 50Ω 特性阻抗的，这是为什么呢？

通常认为导体的截面积越大损耗就越低，但事实并非完全如此。同轴电缆的每单位长度的损耗是 $\lg(D/d)$ 的函数，也就是说和电缆的特性阻抗有关。经过计算可

以发现，当同轴电缆的特性阻抗为 77Ω 时，单位长度的损耗最低。

对于同轴电缆的最大承受功率，通常认为内外导体的间距越大，则同轴电缆可承受电压越高，即承受功率越大，但实际上也不完全准确。同轴电缆的最大承受功率同样与其特性阻抗有关。可以计算出当同轴电缆的特性阻抗为 30Ω 时，其承受的功率最大。

为了兼顾最小的损耗和最大的功率容量，应该在 77Ω 和 30Ω 之间找一个适当的数值。二者的算术平均值为 53.5Ω ，而几何平均值为 48.06Ω ；选取 50Ω 的特性阻抗可以做到二者兼顾。此外， 50Ω 阻抗的连接器也更加容易设计和加工。

绝大部分应用于通信领域的射频电缆的特性阻抗是 50Ω ；在广播电视中则用到 75Ω 的电缆。

大部分的测试仪器都是 50Ω 的阻抗，如果要测量 75Ω 阻抗的器件，可以通过一个 $50-75\Omega$ 的阻抗变换器来进行阻抗匹配，但是需要注意这种阻抗变换器有约 5.7dB 的插入损耗。

驻波比 (VSWR) / 回波损耗

在射频和微波系统中，最大功率传输和最小信号反射取决于射频电缆的特性阻抗和系统中其它部件的匹配。射频电缆的阻抗变化将会引起信号的反射，这种反射会导致入射波能量的损失。

反射的大小可以用电压驻波比 (VSWR) 来表达，其定义是入射和反射电压之比。VSWR 的计算公式如下：

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{P_r / P_i}}{1 - \sqrt{P_r / P_i}}$$

其中 P_r 为反射功率， P_i 为入射功率。

VSWR 的等效参数是回波损耗，反射系数，失配损耗和匹配效率，其换算关系见表 1。

测试电缆组件的 VSWR 指标取决于电缆，连接器及其加工工艺。测试电缆组件的典型 VSWR 值小于 1.2，换算成回波损耗为 21dB ，即入射功率的匹配（传输）效率为 99.21% 。对于传输（即 S_{21} 参数）测试，一条 $VSWR < 1.2$ 的测试电缆可以满足要求了；而作为反射（ S_{11} 参数）测试应用时，对测试电缆的要求要更高些，一般来说，测试系统的回波损耗应该比被测器件高 10dB ，当然除了选用精密的测试电缆以外，还可以巧妙的结合精密衰减器来改善系统的失配损耗（详情将在衰减器相关的应用文章中进行讨论）。

表 1: VSWR 和回波损耗、反射系数之间的关系

VSWR	回波损耗(dB)	反射系数	失配损耗(dB)	匹配效率(%)
1.011	45	0.006	0.000	100.00
1.020	40	0.010	0.000	99.99
1.036	35	0.018	0.001	99.97
1.065	30	0.032	0.004	99.90
1.074	29	0.035	0.005	99.87
1.08	28	0.040	0.007	99.84
1.09	27	0.045	0.009	99.80
1.11	26	0.050	0.011	99.75
1.12	25	0.056	0.014	99.68
1.13	24	0.063	0.017	99.60
1.15	23	0.071	0.022	99.50
1.17	22	0.079	0.027	99.37
1.20	21	0.089	0.035	99.21
1.22	20	0.100	0.044	99.00
1.25	19	0.112	0.055	98.74
1.29	18	0.126	0.069	98.42
1.33	17	0.141	0.088	98.00
1.38	16	0.158	0.110	97.49
1.43	15	0.178	0.140	96.84
1.50	14	0.200	0.176	96.02
1.58	13	0.224	0.223	94.99
1.67	12	0.251	0.283	93.69
1.78	11	0.282	0.359	92.06
1.92	10	0.316	0.458	90.00
2.10	9	0.355	0.584	87.41
2.32	8	0.398	0.749	84.15
2.61	7	0.447	0.967	80.05
3.01	6	0.501	1.256	74.88
3.57	5	0.562	1.651	68.38
4.42	4	0.631	2.205	60.19
5.85	3	0.708	3.021	49.88

从电缆类型来看，半刚和半柔电缆有着比较好的 VSWR 表现。一条普通的 .141”或 .086” 电缆在 dc-18GHz 范围内可以做到小于 1.2 的 VSWR，而并不需要花费太高的成本，当然加工和焊接工艺是保证 VSWR 指标的重要因素。

而柔性电缆要实现低的 VSWR 指标却并非易事。要求电缆在弯曲的条件下仍能保持良好的性能，这二者存在一定的矛盾。为了平衡这种矛盾，也就是得到一条

既柔软又有良好的射频指标的柔性测试电缆，往往需要付出更多的成本代价。

有经验的射频工程师在用网络分析仪测量柔性测试电缆对其进行选择时，往往会在 S11 的测量状态下轻微的抖动电缆，并观察其 VSWR 指标是否随着电缆的抖动而变化。

通常，柔性测试电缆组件可分为 3GHz，6GHz，13GHz，18GHz，26.5GHz，40GHz 或 50GHz 这几种。图 5 是 BXT 生产的一种低成本的 3GHz 测试电缆（MC03-03-03-1000）的典型 VSWR 指标，在 3GHz 以下，其 VSWR 有着非常良好的表现（小于 1.1），这种低成本的测试电缆组件完全可以满足常规的移动通信测试要求。

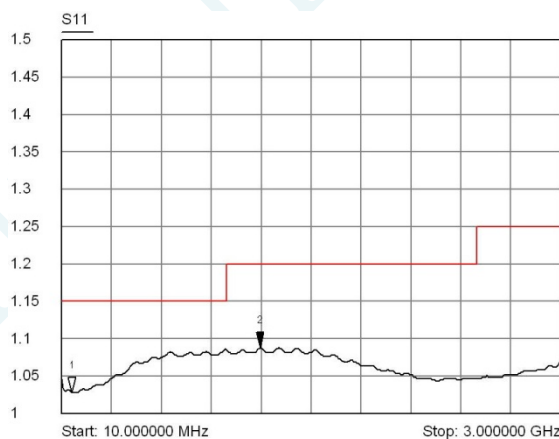


图 5. 一种低成本的 3GHz 测试电缆的典型 VSWR

BXT 的 MC 系列中，有一种可以达到 6GHz 的低成本测试电缆组件—MC06，这种电缆在 6GHz 以下有着良好的 VSWR 表现（图 6），十分适合移动通信应用。

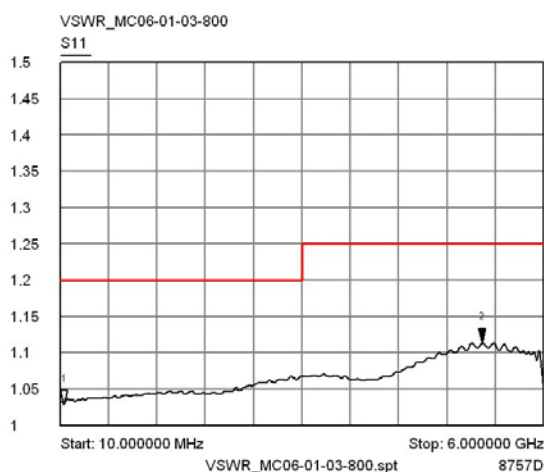


图 6. BXT 低成本的 6GHz 测试电缆的典型 VSWR

而当需要在更高的频率下使用时，则需要采用微波测试电缆组件，这也就意味着用户要花费更高的成本。这是因为微波电缆的设计和制造理念与常规电缆的不同所致，如微波电缆通常采用多层的屏蔽和低密度的聚四氟乙烯材料（LD-PTFE），这种介质的介电常数要比普通的实心聚乙烯（PE）和聚四氟乙烯（PTFE）更低，大约在 1.38~1.73 之间，其相速度（电磁波在电缆中的相对于空气的传播速度）达到 83%，也就是说更加接近于空气的介质特性。

在 BXT 的测试电缆系列产品中，13GHz 以上的微波测试电缆被命名为 TC 系列。图 7 是典型的 TC18 系列电缆的 VSWR，在 18GHz 全频段，其 VSWR 均小于 1.2，TC18 系列可扩展应用到 20GHz，其 VSWR 小于 1.25。

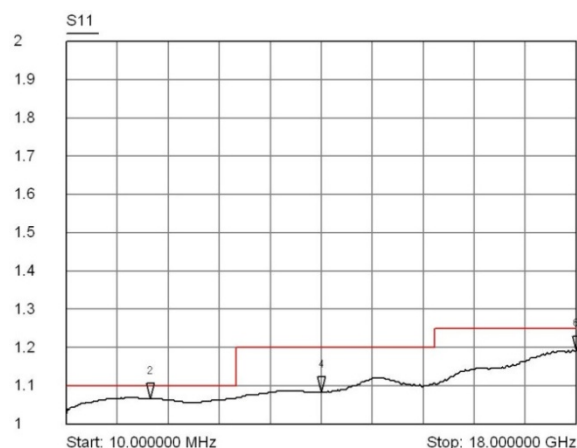


图 7. TC18 (18GHz) 测试电缆的典型 VSWR

衰减 (插入损耗)

电缆的衰减是表示电缆有效的传送射频信号的能力，它由介质损耗、导体（铜）损耗和辐射损耗三部分组成。大部分的损耗转换为热能。导体的尺寸越大，损耗越小；而频率越高，则介质损耗越大。因为导体损耗随频率的增加呈平方根的关系，而介质损耗随频率的增加呈线性关系，所以在总损耗中，介质损耗的比例更大。另外，温度的增加会使导体电阻和介质功率因素的增加，因此也会导致损耗的增加。

电缆的损耗计算过程比较繁琐。首先要计算出导体的射频表明电阻，然后再计算单位物理长度的电阻值，最后再计算出单位长度的损耗值。在工程中，通常采用一种简化的经验算法：

$$loss(dB/100ft.) = k1 \times \sqrt{f} + k2 \times f$$

其中 $k1$ 为电阻损耗系数， $k2$ 为介质损耗系数， f 为频率(MHz)。

几乎所有的电缆手册中都会给出不同频率下的损耗值，这为具体的选型和应用提供了极大的方便。

对于测试电缆组件，其总的插入损耗是接头损耗、电缆损耗和失配损耗的总和：

$$I.L(dB) = I.L_{cable} + I.L_{connector} + M.L$$

测试电缆组件的总体表现是频率越高，损耗越大。图 8 表示了一条典型的测试电缆组件的插入损耗与频率的关系。

在测试和测量应用时，虽然说一条电缆组件的 VSWR 指标怎么追求都不过分，但如果过分的追求低损耗有时候会得不偿失。因为要做到低损耗，需要采用外径更大的电缆，和更低密度的介质，如 LD-PTFE，显然这会增加成本。

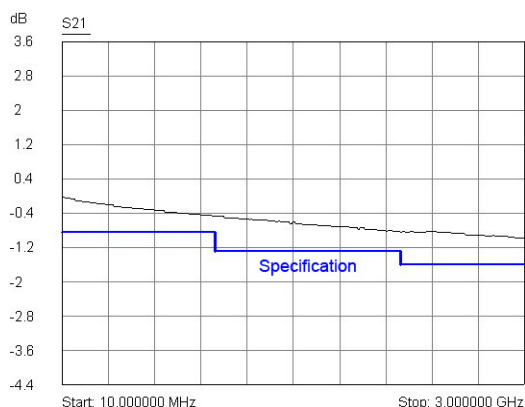


图 8. 测试电缆组件的插入损耗与频率的关系

在 S 参数测量中，测试电缆的损耗是可以被校准的，有时候为了改善信号源的匹配，还可以在信号源的输出端接一个适当衰减量的衰减器（详见衰减器部分的应用文章）；而在功率测量中，则需要低损耗的测试电缆以减少测试误差；不过一些功率测量系统，如 BXT 的 PM2000 系列大信号 S 参数测量系统，已经具有偏置功能，可以将已知的电缆损耗在仪器中加以修正。

在测试电缆组件的使用中，不正确的操作也会产生额外的损耗。例如，对于编织电缆，弯曲也会增加其损耗，见图 9。

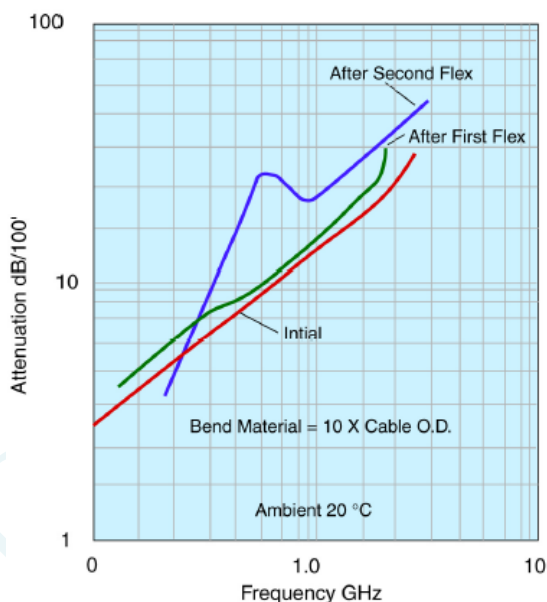


图 9. 由于弯曲而产生的电缆损耗

从图 9 可以发现，相对于正常状态，电缆在静态弯曲条件下的损耗会有所增加，而动态弯曲时损耗则更大。每种电缆都有最小弯曲半径的要求。很多柔性电缆的制造商在产品目录中都会标明其最小弯曲半径，如

Huber+Suhner 的 RG223-U01 电缆，其电缆外径为 5.4mm，产品说明中规定的容许最小弯曲半径为静态 30mm，动态 81mm。在实际使用中，建议电缆的最小弯曲半径不要小于电缆直径的 10 倍。有些电缆组件（如 TC13）外加了铠装护套，就是为了避免电缆过度的弯曲。

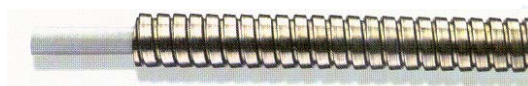


图 10. 外加铠装护套以防止电缆的过度弯曲

在选择电缆组件时，应先确定系统最高频率时可接受的损耗值，然后再根据这个损耗值来选择尺寸最小的电缆。

平均功率容量

功率容量是指电缆消耗由电阻和介质损耗所产生的热能的能力。在实际使用中，电缆的有效功率与 VSWR、温度和高度有关，VSWR 越大，有效功率越小；温度和高度越高，有效功率越小。

射频功率经常用 dBm 来表示，其好处是给计算带来的很大的方便，表 1-2 表示了 dBm 和功率单位之间的互换关系。

表 1-2 dBm 和 mW(W)之间的关系

dBm	mW	dBm	mW
-20	0.010	0	1.000
-19	0.012	+1	1.250
-18	0.016	+2	1.580
-17	0.020	+3	2.000
-16	0.025	+4	2.510
-15	0.032	+5	3.160
-14	0.040	+6	3.980
-13	0.050	+7	5.010
-12	0.063	+8	6.300
-11	0.079	+9	7.940
-10	0.100	+10	10.00
-9	0.013	+11	12.60
-8	0.016	+12	15.80
-7	0.200	+13	19.90
-6	0.025	+14	25.10
-5	0.316	+15	31.60
-4	0.398	+16	39.80
-3	0.501	+17	50.10
-2	0.630	+18	63.10
-1	0.794	+19	79.40

表 1-2 (续) dBm 和 mW(W)之间的关系

dBm	W	dBm	W
+20	0.100	+43	20.00
+21	0.120	+44	25.10
+22	0.159	+45	31.60
+23	0.200	+46	39.80
+24	0.251	+47	50.10
+25	0.316	+48	63.10
+26	0.398	+49	79.40
+27	0.501	+50	100.0
+28	0.631	+51	126.0
+29	0.794	+52	158.0
+30	1.000	+53	200.0
+31	1.260	+54	251.0
+32	1.590	+55	316.0
+33	2.000	+56	398.0
+34	2.550	+57	501.0
+35	3.160	+58	631.0
+36	3.910	+59	794.0
+37	5.010	+60	1000
+38	6.310	+63	1995
+39	7.940	+65	3162
+40	10.00	+66	3981
+41	12.60	+67	5012
+42	15.80	+70	10000

聚四氟乙烯 (PTFE) 介质的电缆比聚乙烯 (PE) 的电缆具有更高的功率容量。如美军标 MIL-C-17 中的 RG142 (PTFE) 和 RG223 (PE)，虽然二者的尺寸十分接近，但是由于介质材料的不同，导致 RG142 的功率容量远远大于 RG223，前者约为 400W@1GHz，而后者仅约为 120W@1GHz。

BXT 的 MC 系列电缆则结合了这二种电缆的优点，既有 RG223 的柔软度，又可达到 RG142 的功率容量和温度稳定性。

传播速度

电缆的传播速度是指信号在电缆中传输的速度和光速的比值，和介质的介电常数的根号呈反比关系：

$$V_p (\%) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \times 100\%$$

由上式可见介电常数（ ϵ_r ）越小，则传播速度越接近光速，所以低密度介质的电缆其插入损耗更低。

了解传播速度的另一个意义是可以计算电缆的电长度。在测试和测量中的一个典型例子是天线和电缆分析仪的故障定位（DTF）功能，见图 11。

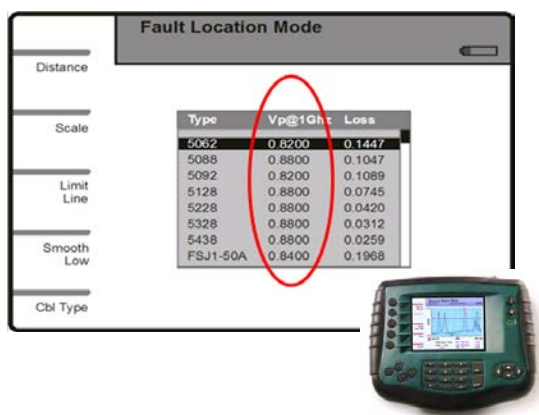


图 11. 可以测量电缆长度的天线和电缆分析仪

在故障定位的测量中，天线和电缆分析仪内置的信号源向电缆的远端发一个信号，并根据回波损耗到达仪器的时间来计算电缆的长度或者故障点的位置，操作者必须通过相应的选项来告诉仪器被测电缆的传播速度，以保证测试精度。

弯曲时的相位稳定性

弯曲-相位稳定性是衡量电缆在弯曲时的相位变化的指标。在使用过程中电缆的弯曲将会影响到插入相位的变化。减少弯曲半径或增加弯曲角度都会增加相位的变化。同样，弯曲次数的增加也会导致相位变化的增加。而增加弯曲直径/电缆直径之比则会减少相位的变化。相位变化和频率基本上呈线性关系。微孔介质电缆的相位稳定性会明显优于实心介质电缆，多股内导体的电缆的相位稳定性优于单股内导体的电缆。

TC18-C 型柔性微波电缆组件具有良好的相位稳定性，当电缆以 26mm 的半径弯曲 360°时，其相位的变化量仅为±0.1°/GHz。

电缆的无源互调失真

电缆的无源互调失真是由其内部的非线性因素引起的。在一个理想的线性系统中，输出信号的特性与输入信号是完全一致的；而在非线性系统中，输出信号和输入信号相比会产生幅度失真。

如果有二个或更多的信号同时输入一个非线性系统，由于互调失真的存在，将会在其输出端产生新的频率分量。在现代通信系统中，工程师们最关心的是三阶互调产物 ($2f_1-f_2$ 或 $2f_2-f_1$)，因为这些无用的频率分量往往会落入接收频段从而对接收机产生干扰。

同轴电缆组件通常被视为线性器件。但是，纯线性器件是不存在的。在接头和电缆之间总有些非线性因素存在，这些非线性因素通常是由于表面氧化层或者接触不良所造成的。以下的通用设计原则可以减少无源互调失真：

- ✓ 在设备中，尽量用半刚电缆或者半柔电缆代替柔性电缆
- ✓ 用单股内导体的电缆
- ✓ 用表面平滑的高质量接头
- ✓ 采用足够厚度和均匀镀层的接头
- ✓ 采用尺寸尽可能大的接头（如 DIN716 的互调特性优于 N，而 N 则优于 SMA）
- ✓ 保证接头之间良好的接触
- ✓ 使用非磁性材料的接头

在一些特殊的测试场合（如无源器件的互调测量、蜂窝基站的杂散测量等）需要采用低互调测试电缆。BXT 可提供无源互调指标为 $-165\text{dBc}@2\times 43\text{dBm}$ 的专用低互调测试电缆，即使是普通的编织电缆，也可以达到 $-140\text{dBc}@2\times 43\text{dBm}$ ，可以满足绝大多数测试的需要。

BXT 可以提供哪些电缆组件？

BXT 具备射频电缆组件的设计，开发和生产能力，最高频率可达 40GHz。具体产品可分为以下几大类：

- RG 系列通用测试电缆组件 — 满足 3GHz 以下的常规测试；
- MC 系列通用测试电缆组件 — 覆盖到 6GHz，兼顾了柔韧性、大功率和稳定性的低成本测试解决方案；
- TC18-C 系列柔性微波电缆组件 — 可满足 18GHz 以下的实验室应用；
- TC18 系列铠装微波电缆组件 — 可工作至 20GHz，为野外应用而设计的牢固的测试电缆组件；
- TC26 和 TC40 系列微波电缆；
- 低互调测试电缆组件 — 用于无源互调测试和蜂窝基站杂散测试，其自身的无源互调值小于 $-165\text{dBc}@2\times 43\text{dBm}$ ；
- 大功率测试电缆组件 — 采用耐高压的特种接头，满足大功率（至 10kW）应用环境，如半导体生产中的功率校准；
- 半刚和半柔电缆组件 — 满足 40GHz 以下设备内部互联应用。