

## 汽车毫米波雷达的表面处理技术

### 1. 概论

毫米波雷达的天线前面有一个不但保护毫米波雷达，而且毫米波能够通过的天线罩。通常，在天线罩前有一个带有汽车标志的车标和雷达外壳，它能够让毫米波通过，并且使其不弯曲或扩散。另一方面，车标后面包住雷达的外围的材料最好能够吸收来自车标的反射波。接下来，将论述这些的表面处理技术及其评估方法。

按如下次序进行论述：

- 天线罩和外壳的最佳厚度、防反射膜的设计方法及其评价方法。
- 车标的结构与评估的方法。
- 雷达外壳材料的电波吸收及其评价方法
- 防水处理方法
- 亲水化处理法

### 2. 天线罩和外壳的最佳厚度、防反射膜的设计方法及其评价方法

图 2.1 是用于决定圆顶和外壳的最佳厚度的说明图。

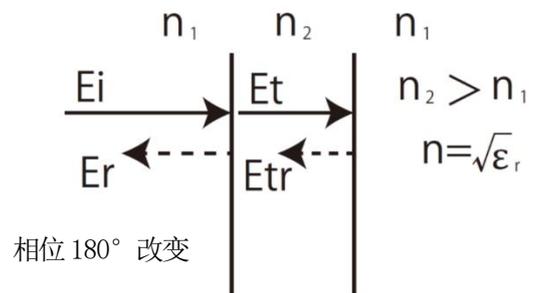


图 2.1 最小化反射的厚度

$n_1$ : 入射介质的折射率，通常为空气

$n_2$ : 天线罩和外壳的折射率

$\epsilon_r$ : 介电常数,  $n = \sqrt{\epsilon_r}$

$E_i$ : 入射电场

$E_t$ : 传输电场

$E_r$ : 反射电场

$E_{tr}$ : 传输电场的反射波

$\lambda$ : 波长

$t$ :  $n_2$  材料厚度

· 最佳厚度

由于天线罩和外壳的折射率大于空气， $n_2$  材料的反射波与入射波的相位相反；从  $n_2$  材料传输到空气时产生的反射波  $E_{tr}$  与透射波  $E_t$  相位相同。当反射波  $E_{tr}$  回到空气中时，与  $E_r$  的同相合成， $E_r + E_{tr}$  与  $E_i$  合成时，使其最小而设计的。也就是说，

$$t = \frac{1}{2} \lambda \frac{1}{n} \times m \quad m: \text{倍数}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon r}} \times m$$

执行波长的  $1/2$  的整数即可。

· 防反射膜的优化

接下来，要描述防反射膜的优化。当天线罩和外壳以上述的方法进行最佳厚度设计时，在设计频率范围，反射小于  $-15\text{dB}$  并不难。然而，当使用频率超过中心频率的  $3\%$  时，由于反射增加，防反射膜将有效发挥作用。图 2.2 显示了防反射膜的讨论条件。在这种情况下，方程式如下所示。

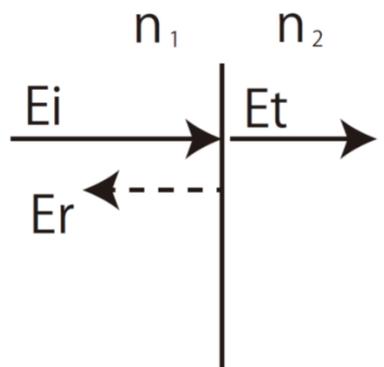


图 2.2 防反射膜的最佳条件

$$E_r = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \times E_i \quad (2-1)$$

$$E_t = \frac{2n_1}{n_2 + n_1} \times E_i \quad (2-2)$$

$$\therefore R = \left(\frac{E_r}{E_i}\right)^2 \times 100 = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \times 100[\%] \quad (2-3)$$

$$T = \left(\frac{E_t}{E_i}\right)^2 \times 100 = \frac{4n_1^2}{(n_2 + n_1)^2} \times 100[\%] \quad (2-4)$$

从这些关系中，列举出板的折射率和传输能量之间的关系如下：

n	1.45	1.342	1.304	1.14
$\epsilon r = \sqrt{n}$	2.1	1.8	1.7	1.3
入射传输能量[%]	96.87	97.87	98.26	99.79
双面传输能量[%]	93.26	95.79	96.55	99.59

为了改善这些传输量的衰减和反射的不利影响，使用式（2-3），得到以下结果。

- 1) 在折射率 n 的表面，贴 $\sqrt{n}$ 、厚度 $\frac{1}{4}\lambda$ 的膜。
- 2) 在折射率 n 的表面，贴 $\frac{1}{16}\lambda$ 以下凹凸的膜。

· 评估方法

图 2.3 是毫米波雷达用的车标及其外壳的反射衰减和传输衰减的测量系统。

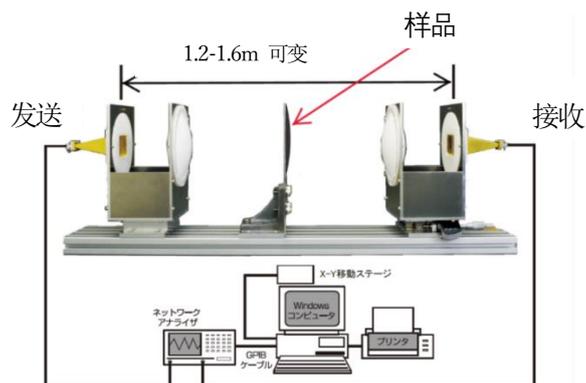


图 2.3 反射衰减量，传输衰减量测量系统

将介电透镜放在发射的喇叭天线前，使其发送平面波，将平面波照射到车标和外壳上，由并发的喇叭天线接收其反射波。此外，通过样品的平面波通过介电透镜，聚集在接收的喇叭天线上。将这透镜系统连接到网络分析仪，测量样品的反射衰减量和传输衰减量，同时扫描频率。

图 2.4 为测量结果的 1 个示例，以聚碳酸酯为主要原料的车标，在 76.5GHz 时传输衰减量最小而设计的。按照大致的设计，传输衰减量是 0.7dB。但是，该测试结果显示在 74GHz 时反射衰减量最小，值是-28dB，在 76.5GHz 时不是最小，原因是样品是带曲面的。也就是说，在使用的频率下，如果反射衰减量必须低于指定值，则设计也需要考虑曲面的形状。

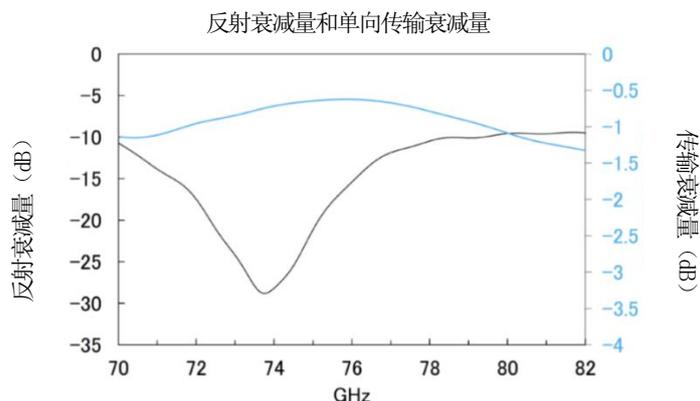


图 2.4 反射衰减量和传输衰减量的测量示例

### 3. 车标的结构和评估方法

车标是汽车的标志，如图 2.5 所示。通常，汽车雷达被安装在车标后面，这就必须开发毫米波可以通过的车标。



图 2.5 车标的一种

以下是车标后面的毫米波雷达的毫米波能够通过车标的技术要求。

- 1) 毫米波通过车标，比如射向前方行驶的汽车，而发射回来。此时往返车标的衰减小于 2dB（分贝），即超过 70%通过标志（在往返时）。
  - 2) 当毫米波通过车标时，它会弯曲一点。此方向的偏差（倾斜）在 0.3 度以内。为了满足这些，需要：
    - (1) 选择材料应具有低衰减量。
    - (2) 将车标的厚度做成  $1/2$  波长的整数倍，以便使车标表面的毫米波的反射和背面的反射成相反相位，相互抵消表面和背面的反射。
    - (3) 使车标的厚度均匀，使毫米波通过车标的任何位置的通过时间都一样。
- 另一件重要的事情是，车标中含有字母和符号具有金属光泽，应使电波能够通过它。

- 电波传输的金属薄膜

车标上有银色的标志。如果雷达放置于车标后面，则必须使毫米波能够通过这个标志。因此，利用真空蒸着和溅镀，用铟等形成金属皮膜。溅镀时间为 10 秒左右，利用铟的自然凝集现象将粒径控制在 100nm 左右。这样铟使表面成金属光泽，即使表面阻力大，电波也能通过。图 2.6 是通过溅镀而获得的铟皮膜的显微镜照片。

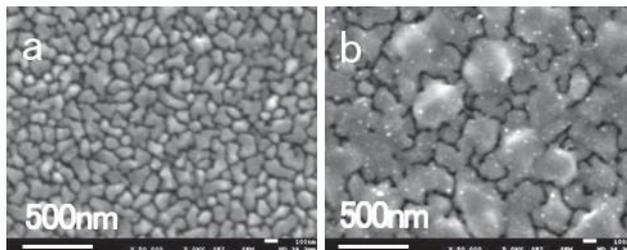


图 2.6 由溅镀而而成的铟皮膜

a : 溅镀时间 10 秒、b : 溅镀时间 30 秒

请注意，当溅镀时间为 30 秒时，电波不能通过。此外，车标通常由两片塑料制成，内侧的溅射铟。除铟以外，钛和锡也能自然凝集，比如通过具有多数点图案的面罩，让铝蒸着等，因为最近正朝着低价格化竞争的方向发展。

从技术上讲，能够使文字等显美丽的金属光泽，文字具有凹凸，并且使往返电波的衰减在 2dB 以内，倾斜度在 0.3 度以内。

- 电波通过性的试验

图 2.7 是车标评估系统的一种，keycom 制造的 EES-01。

接收侧有四个天线。在放入车标之前用四个天线接收发射波束，并将所有天线的接收电平调整为相同值。接着放入车标，根据四个天线的接收电平的平均值来计算衰减量，并且根据天线之间的接收电平的差来计算倾斜量。

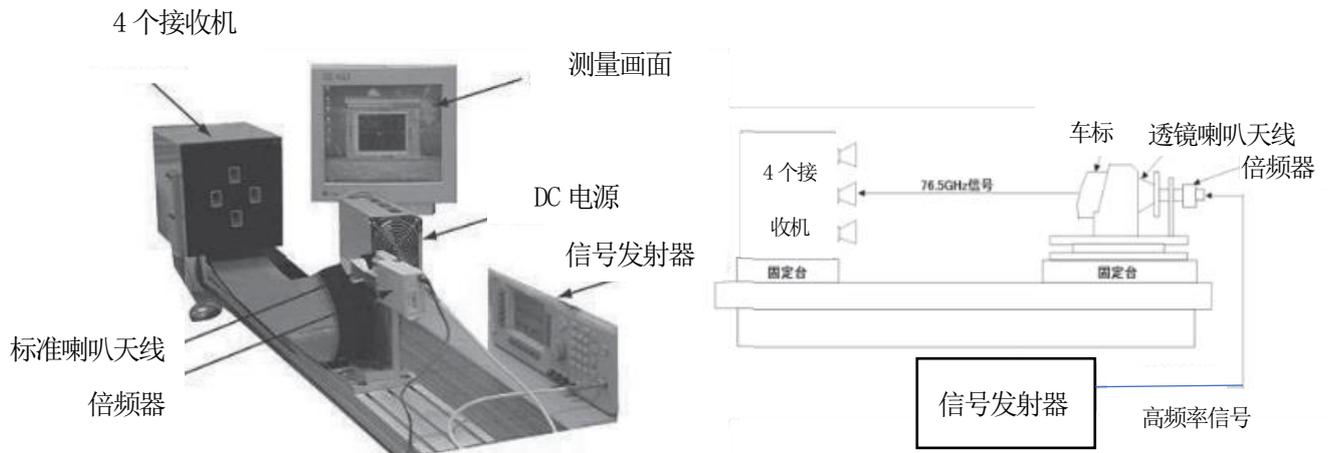


图 2.7 车标评估系统

#### 4. 雷达外壳材料的电波吸收及其评价方法

如果雷达前方有车标，则电波会在车标处反射。用安装固定雷达的结构体也会反射电波。这个电波将是雷达波束恶化的原因。因此，可以在固定构造体上贴上电波吸收膜。接下来论述该电波吸收膜的结构和测量方法。

首先，电波吸收膜应该具有在电波的发射侧不反射电波，而且，还有一件重要的是，电波无法穿透该膜。因此，一般在铝膜等上面贴上含碳的介质薄膜，或者涂上含碳的介质涂料。

另外，衰减量可以用下面的公式表示。

$$\alpha = 10 \log \left[ \frac{\frac{1}{\sqrt{\epsilon r}} \tanh \left( j \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon r} \right) - 1}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon r}} \tanh \left( j \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon r} \right) + 1} \right] [dB]$$

$\alpha$ : 衰减量、 $\epsilon r$ : 复介电常数、 $d$ : 电波吸收层厚度[mm]、 $\lambda_0$ : 电波波长[mm]

衰减量  $\alpha$  是  $d$  和  $\epsilon r$ , ( $\epsilon' r - j\epsilon'' r$ ) 的函数，需要以最大衰减量进行模拟。例如，像表 1 所示的结果。

表 1 电波吸收体的构成

频率	d [mm]	$\epsilon' r$	$\epsilon'' r$	$\alpha$ [dB]
76.5 GHz	0.20	24.2	6.2	36.8
	0.25	15.8	4.9	38.4
	0.30	10.9	4.1	32.8
	0.35	8.2	3.5	41.6

· 试制作膜的复介电常数的测量

毫米波电波吸收膜的衰减量需要 30dB 左右，但至少要达到 20dB 以上。

根据模拟的结果，以厚度作为制作目标，做 $\epsilon' r$ 和 $\epsilon'' r$ 的试料。制作最适合的样品需要 5 种以上的试制品。因此，试料的大小要控制在 150mm×150mm 左右。下面以这种程度的大小，介绍 $\epsilon' r$ 和 $\epsilon'' r$ 能够精度良好地测量的装置。该装置称为“毫米波复介电率频率变化法测量装置”，其测量装置和测量结果如图 2.8 所示。

测量电源通过片状材料时的频率与传输衰减量的关系，根据传输衰减量的最小频率和厚度来计算介电常数 $\cdot \epsilon' r$ 。另外，根据此时的传输衰减量可以计算出 $\epsilon'' r$ 。

这样就可以决定，使用容易入手的制作电波吸收膜的材料的结构，接着制作 300mm×300mm 的试料，最后进行电波吸收率的测量。

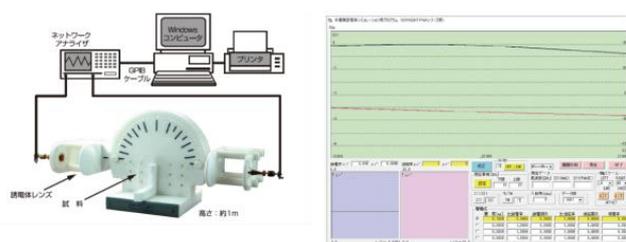


图 2.8 毫米波复介电常数的频率变化测量装置和测量结果

电波吸收率的测量

对电波吸收膜发射平面波，然后根据发射量和反射量的比来计算吸收率。以前使用拱形法，现在这里介绍透镜天线法。使用透镜天线将发射波变为平面波，所以测量精度高，效率也高，不需要暗室，在一般的房间可以测量。另外，可以每隔 5° 改变入射角和反射角进行测量。图 2.9 是配置图和测量示例，该测量方法符合 JIS R 1679 : 2007 和 IEC 62431 : 2008 的规格。

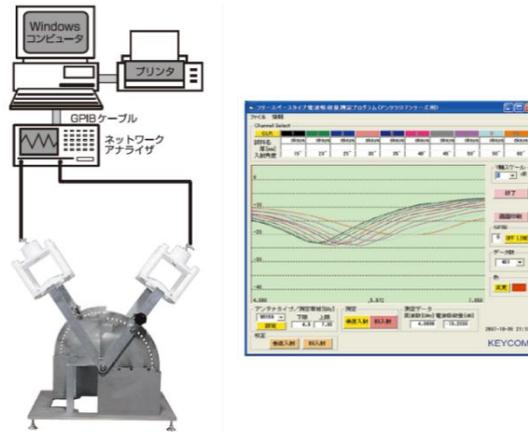


图 2.9 电波吸收测量设备示例

## 5. 其它的电波吸收法和测量法

安装雷达的装置包括铁、铝或带铝的塑料。在这种情况下，使用导电片塞入外壳的孔和安装导电垫片，使外壳不会成为向四周发射信号的天线的应对措施。但是，最近外壳内成为谐振器，不需要的电磁波被放大 100 倍，500 倍，其中一些从孔或电缆或表面泄漏。因此，成为导体的外壳表面成为能够吸收电波的。当连接时，它将成为导体。也就是说，能够导电的具有吸收电波的导电外壳已经变得有用处了。接着介绍类似这种材料的评价系统。

图 2.10 显示了系统的谐振器部分。将材料切成一个 40mm 的矩形，并粘贴到塑料安装装置中，并放入腔谐振器中。

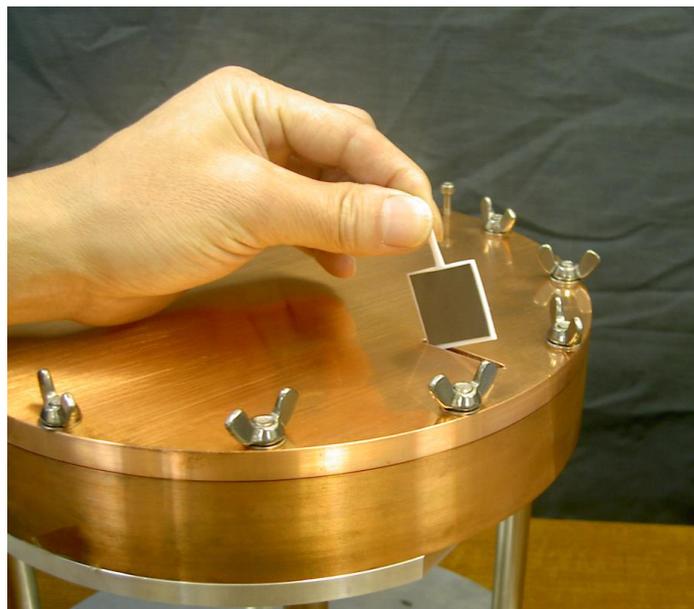


图 2.10 抗 EMI 的外壳材料评估系统

当谐振器为空时，放入样品，谐振频率和 Q 值会随着样品的放入而降低。此 Q 值降幅越大，说明外壳的材料越优良。表 2 显示了系统的结果和实际外壳的谐振 Q 值，但趋势是一致的，并且与抗 EMI 效应有良好的匹配。

表 2 各种材料的 Q 值和外壳的 Q 值

材料名	本系统的 Q	实际外壳的 Q	EMI 效果
空 (无材料)	6265	-	-
A	6133	2300	N/A
B	5635	2110	合格
C	5370	2000	良
D	5218	1950	优

顺便提一下，实际测量材料 C 时的测量屏幕如图 2.11 所示。图形是谐振曲线。此外，Q 值显示在右侧部分。

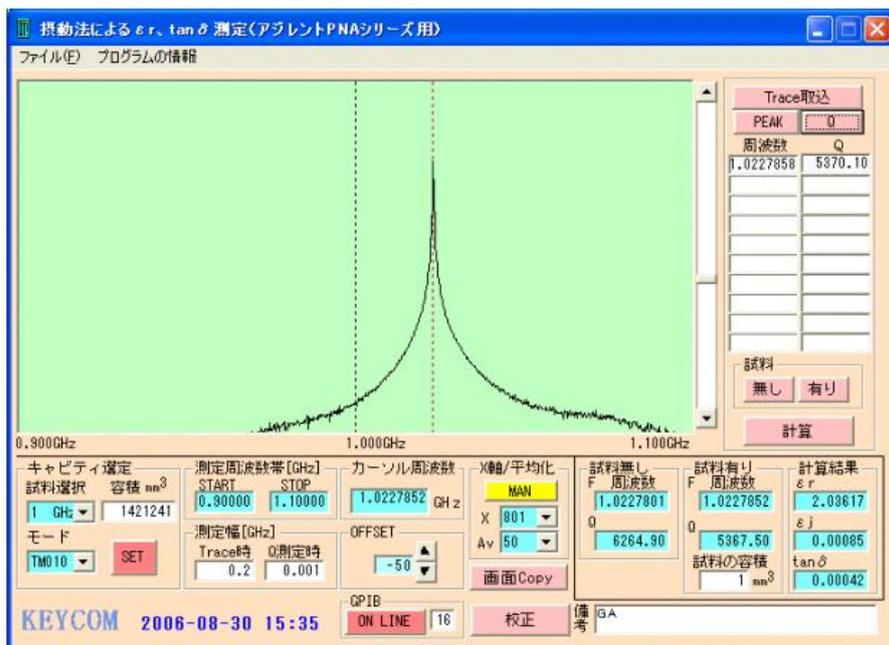


图 2.11 材料 C 的谐振图和 Q 值

## 6. 防水处理方法

当水粘在车标或雷达外壳上时，毫米波的穿透性将大大降低。因此，即使下雨，最好让车标和外壳的水成为水珠迅速消散。顺便说一句，当水滴到平面样品中时，当接触角为  $120^\circ$  时，样品具有防水性。此外，当它变成  $150^\circ$  时，样品具有超防水性。这意味着样品表面的表面自由能量降低。

顺便说一句，为了实现超防水性，最好在样品表面涂覆超防水材料。在几种超防水剂当中，饱和氟烷基在化学上是稳定，但是不容易粘附于样品，因此要掺入耦合剂。顺便说一句，当在样品表面形成细的不均匀结构，如柱状结构或剑山结构时，往往有利于超防水剂的效果。这种不均匀的结构可以通过光环等形成。

在这里，在超防水方面的主要问题是难以保持耐久性。当油等粘附时，超防水性降低。此外，如与飞来物体接触，表面结构也会受损，超防水性将会降低。

## 7. 亲水化处理方法

当在样品表面形成薄水膜时，毫米波的传输衰减会增加一点，但不会超过 1dB。如果有耐久性，即使表面结构受到轻微损坏，比起防水处理，稳定的超亲水处理也是比较好的方法。

当水附着在样品上时，为了降低接触角，可以对表面进行不均匀的接触。这时可使用常见的具有自洁功能的二氧化钛 ( $\text{TiO}_2$ )。

同时，受到紫外线的二氧化钛激发，使结晶中的氧化分子和钛分子分离，其结果是二氧化钛中形成氧痕迹的缺陷，水分子吸附在这个缺陷中产生超亲水性。

## 8. 总结

在本文中，我们特别注重，在碰撞和自动驾驶中起着重要作用的雷达。先叙述了，防反射膜的形成法，毫米波传输膜膜的制造和评估法，毫米波吸收膜的设计和评估法，最后，车标和雷达外壳等被雨水淋湿时应对措施，介绍了材料表面的防水化处理法和亲水化处理法，等等支撑着雷达的表面处理技术。此外，还有许多其他有用的表面处理技术领域。我们希望您尝试挑战各种表面处理技术。

参考文献

- 1) United States Patent No. US 6,328,358B1 “Cover Part Located within the Beam Path of a Radar” .
- 2) 斎藤隆之、坂村喬史、田中大之、可児 浩、宮崎俊之；材料への金属皮膜形成技術と自動車部品への応用、北海道立総合研究機構研究成果報告、平成 24-26
- 3) H. Suzuki, A. Nishikata, Y. Higashida, T. Soh, O. Hashimoto ; *IEICE transactions on electronics*, E89-C. (1), 24 (2006)