

信息的传输¹

作者：R. V. L. HARTLEY

摘要：本文提出了一种基于物理而非心理考虑的“信息”的定量度量方法。从暂态的角度讨论了系统中这种信息的传输速率如何受到能量存储引起的失真的限制。回顾了暂态和稳态观点之间的关系。研究表明，当利用能量存储将稳态传输限制在有限的频率范围内时，可传输的信息量与频率范围的宽度和该范围可用时间的乘积成正比。文中包含了几条将该原理应用于实际系统的示例。在图片传输和电视的情况下，对强度的空间变化采用了一种类似于常用的时间变化分析的稳态方法。

虽然电通信中涉及的频率关系本身很有趣，但除非我们能从中推导出对通信系统工程具有相当普遍实际应用价值的东西，否则我很难有理由在此讨论它们。我在这方面希望达到的目的是建立一个定量的度量标准，以此来比较各种系统传输信息的能力。在这样做时，我将讨论其在电报、电话、图片传输以及有线和无线路径上的电视系统的应用。当然，我们会发现，在许多情况下，充分利用系统的全部物理可能性在经济上是不切实际的。然而，这样的标准对于估计设备或电路改进可能带来的性能提升，以及发现所提出系统操作理论中的谬误，通常是很有用的。

由于将要获得的结果代表了在相当理想化条件下预期的极限，因此允许通过忽略某些因素来简化讨论，这些因素虽然在实践中往往很重要，但其效果仅仅是使性能离理想情况更远一些。例如，外部干扰在实践中永远无法完全消除，它总是会降低系统的有效性。然而，我们可以任意假定它不存在，并考虑仍然由传输系统本身造成的限制。

为了为这些频率关系的更实际应用奠定基础，首先有必要讨论一些较为抽象的问题。

信息的度量

当我们谈到系统传输信息的能力时，我们隐含了信息的某种定量度量。正如通常所使用的，“信息”是一个非常灵活的术语，因此首先需要为它建立一个更具体的含义，以适应当前的讨论。作为出发点，让我们考虑通信涉及哪些因素；无论是有线、直接语音、书面还是任何其他方式进行的通信。首先，必须有一组物理符号，如单词、点和划等，通过普遍约定，向通信双方传达某些含义。在任何给定的通信中，发送者在心理上选择一个特定的符号，并通过某种身体动作（如他的发声机制）引起接收者对该特定符号的注意。通过连续的选择，一系列符号被带到听者的注意中。每次选择都排除了所有其他可能被选择的符号。随着选择的进行，越来越多可能的符号序列被排除，我们说信息变得更加精确。例如，在“苹果是红色的”这个句子中，第一个词排除了其他种类的水果以及所有其他一般的物体。第二个词将注意力引向苹果的某个属性或状态，第三个词排除了其他可能的颜色。然而，它并没有排除关于苹果大小的可能性，这些进一步的信息可以通过后续的选择来传达。

由于信息的精确度取决于可能选择的其他符号序列，因此希望在这些序列的数量中找到所需的定量信息度量似乎是合理的。在任何一次选择中可用符号的数量显然因所用符号的类型、特定通信者以及他们之间先前存在的理解程度而有很大差异。对于说不同语言的两个人来说，可用符号的数量与说同一种语言的人相比可以忽略不计。因此，需要消除所涉及的心理因素，并建立一种仅依据物理量的信息度量。

心理因素的消除

为了说明如何做到这一点，考虑一个人工操作的海底电报电缆系统，其中示波记录器在感光带上描记接收到的消息。假设发送操作员有一个发送键的三个位置可供使用，分别对应两种极性的外加电压和无外加电压。在选择时，他决定通过将键扳到对应那个符号的位置，来引起对三种电压条件或符号之一的注意。通过电缆传输的扰动就是一系列有意识选择的结果。然而，一个类似的由任意选择符号组成的序列，可能已经由一个自动机制发送，该机制根据一系列随机操作（如一个球滚入三个口袋之一）的结果来控制键的位置。

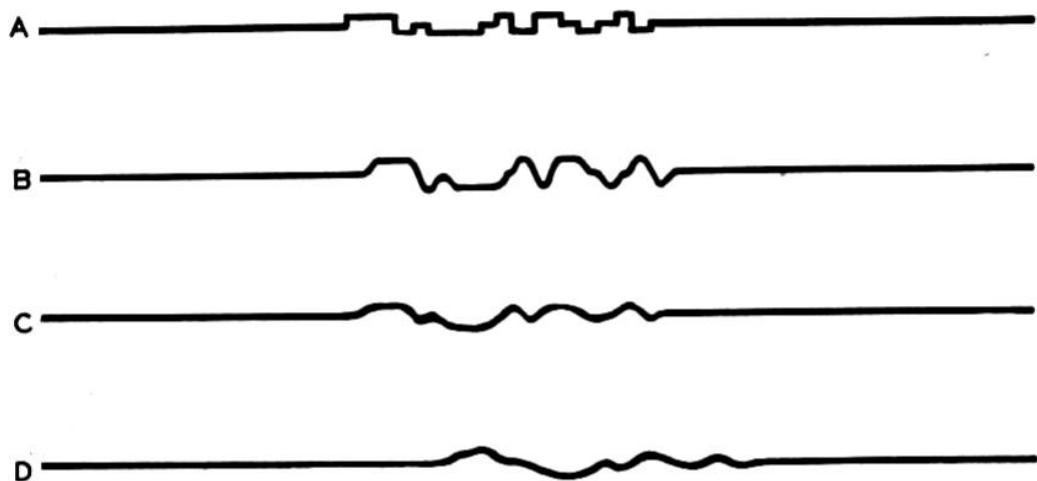


图 1

由于电缆的失真，通过记录器轨迹展示给接收者的各种选择结果，不如它们在发送键位置上那样清晰可辨。图1在 \$A\$ 处显示了键位置的序列，在 \$B\$、\$C\$ 和 \$D\$ 处显示了在长度逐渐增加的人工电缆上接收时记录器描记的轨迹。对于最短的电缆 \$B\$，重建原始序列很简单。然而，对于中等长度 \$C\$，需要更多注意才能区分记录的特定部分代表哪个键位置。在 \$D\$ 中，符号变得完全无法区分。系统传输特定符号序列的能力取决于在接收端区分发送端各种选择结果的可能性。从接收记录中识别发送端选择的符号序列的操作，可以由我们这些不熟悉摩尔斯电码的人来执行。对于代表有意识选择消息的序列和前面提到的自动选择设备发出的序列，我们同样可以很好地做到这一点。然而，一个训练有素的操作员会说自动设备发出的序列不清晰。原因在于，只有有限数量的可能序列被赋予了他和发送操作员共同理解的含义。因此，发送操作员在某些选择时可用的符号数量在这里受到的是心理而非物理考虑的限制。使用其他代码的其他操作员可能会做出其他选择。因此，在估计物理系统传输信息的能力时，我们应忽略解释的问题，使每次选择完全任意，并将我们的结果基于接收者区分选择任一符号与选择任何其他符号的结果的可能性。通过这种方法，心理因素及其变化被消除，从而有可能建立一种仅基于物理考虑的明确的信息定量度量。

信息的定量表达式

每次选择都有三个可能的符号可用。两次连续选择使得 3^2 或 9 种不同的排列或符号序列成为可能。类似地， n 次选择使得 3^n 种不同的序列成为可能。假设不是这个使用三种电流值的系统，而是提供了一个系统，其中任意数量 s 的不同电流值可以施加到线路上，并且在接收端可以相互区分。那么每次选择可用的符号数量是 s ，可区分的序列数量是 s^n 。

考虑波多打印电报系统的情况，其中操作员选择字母或其他字符，每个字符在传输时由一系列符号组成（通常为五个）。我们可以将各种电流值视为初级符号，而将这些代表字符的各种序列视为次级符号。那么，可以在发送端在初级符号或次级符号中进行选择。假设操作员选择了一个由 n_2 个字符组成的序列，每个字符由 n_1 个初级选择组成。每次选择时，他将拥有与从 s 个初级符号中进行 n_1 次选择所能产生的不同序列数量一样多的不同次级符号。如果我们称这个次级符号的数量为 s_2 ，那么

对于波多系统

由 n_2 次次级选择可能产生的次级符号序列的数量是

现在， $n_1 n_2$ 是如果没有将初级符号分组为次级符号的机制，产生相同序列所需初级选择的次数 n 。因此我们看到，无论初级符号是否为了解释的目的而被分组，可能的序列总数都是 s^n 。

那么这个数字 s^n 就是我们期望能用作信息度量的可能序列数。让我们看看它在多大程度上满足这样一个度量的要求。

对于一个特定的系统和操作模式，可以假定 s 是固定的，而选择次数 n 随着通信的进行而增加。因此，用这种度量，传输的信息量将随着选择次数呈指数增长，单次选择对总传输信息的贡献将逐步增加。毫无疑问，从心理学的角度来看，这种增加在通信中确实经常发生。例如，在漫长讨论结束时说出的“是”或“否”这单个词，可能具有非同寻常的巨大意义。然而，这种情况是例外而非规则。讨论主题甚至参与者的不断变化，在实践中将这种指数关系的累积作用限制在相对较短的时期内。

此外，我们正在建立一个独立于心理因素的度量。当我们考虑一个物理传输系统时，我们发现传输连续选择结果所需的设施并没有这种指数增长。所涉及的各种初级符号在接收端对于一次初级选择与另一次同样可区分。电报系统发现传输一个十字消息并不比前一个更难。一个现在能成功传输语音的电话系统，只要系统保持不变，就会继续这样做。因此，为了使信息度量具有实际的工程价值，它应该具有这样的性质：信息与选择次数成正比。因此，可能的序列数本身不适合直接用作信息度量。

然而，我们可以用它作为基础，推导出一个满足实际要求的度量。为此，我们任意地使信息量与选择次数成正比，并选择比例因子，使得相等的信息量对应于相等数量的可能序列。对于一个特定系统，设与 n 次选择相关的信息量为

其中 K 是一个取决于每次选择可用符号数 s 的常数。取任意两个系统，其 s 值分别为 s_1 和 s_2 ，并设相应的常数为 K_1 和 K_2 。然后我们通过以下条件定义这些常数：每当两个系统的选择次数 n_1 和 n_2 使得两个系统的可能序列数相同时，那么两个系统的信息量也相同；也就是说，当

由此可得

只有当 K 与 s 通过下式关联时，此关系式对所有 s 值都成立：

其中 K_0 对所有系统都相同。由于 K_0 是任意的，如果我们使对数的底数任意，则可以省略它。选择的特定底数决定了信息单位的大小。将此 K 值代入 (4)，

因此，我们所做的就是将可能符号序列的对数作为信息的实际度量。

这种情况类似于测量电话系统中因插入一件设备而产生的传输损耗。插入的效果是改变接收器接收功率的某个比率。这个比率可以被视为损耗的度量。然而，人们发现更方便的是取功率比的对数作为传输损耗的度量。

如果我们令 n 等于 1，我们会看到与单次选择相关的信息是可用符号数的对数；例如，在上面提到的波多系统中，初级符号或电流值的数量 s 是 2，一次选择的信息量是 $\log 2$ ；涉及 5 次选择的一个字符的信息量是 $5 \log 2$ 。如果我们把一个字符看作一个次级符号，并取这些符号数量的对数，即 $\log 2^5$ 或 $5 \log 2$ ，会得到相同的结果。100 个字符的信息量将是 $500 \log 2$ 。信息的数值将取决于所使用的对数系统。将电流值的数量从 2 增加到比如 10，即比例为 5，将使给定选择次数的信息含量增加 $\frac{\log 10}{\log 2}$ 或 3.3 倍。它对传输速率的影响将取决于选择速率如何受到影响。这将在后面讨论。

当如同刚才考虑的情况，所有次级符号都涉及相同次数的初级选择时，关系相当简单。当使用非均匀代码的电报系统时，它们就复杂得多。一个看似困难但实际不然的问题出现了，源于这样一个事实：给定次数的次级或字符选择可能需要非常不同的初级选择次数，这取决于所选的特定字符。这似乎表明从初级符号和次级符号推导出的信息值会不同。然而，很容易证明这并不一定成立。

如果发送者始终可以自由选择任何次级符号，他可以在所有包含最多初级符号的符号中进行选择。那么次级符号的长度都将相等，并且，就像均匀代码一样，初级符号的数量将是字符数乘以每个字符的最大初级选择次数的乘积。如果对于给定数量的字符，初级选择次数要保持在比这更小的某个值，就必须对次级符号选择的自由施加某种限制。当我们计算非均匀代码每个字符的平均点数，并考虑电报消息中各种字符的平均出现频率时，就施加了这样的限制。如果在发送消息时不允许超过这个分配的每字符点数，操作员平均上必须避免更频繁地选择较长的字符，以免超过它们的平均出现率。用当前的讨论语言来说，我们会说，对于 n_2 次次级选择中的某些次，次级符号的数量 s_2 被减小了，使得对所有字符的信息内容求和得到的值等于从所涉及的初级选择总数推导出的值。这可以写成

其中 n 是分配给 n_2 个字符的初级符号或点长度的总数。这表明初级符号为评估信息提供了最便捷的基础。

到目前为止的讨论主要涉及电报学。当我们试图将这个想法扩展到其他形式的通信时，需要进行一些概括。例如，在语音中，我们可以假设初级选择代表连续单词的选择。在此基础上， s 将代表可用单词的数量。对于对话的第一个词，这将对应于语言中的单词总数。对于后续的选择，数量通常会减少，因为后续的单词必须以可理解的方式与前面的单词组合。然而，这样的限制仅仅是解释上的限制，系统同样能够传输语言中所有可能的单词排列都可理解的通信。此外，电话系统传输一种语言的语音可能与传输另一种语言的能力相同。每个单词可以用多种方式说出，用更多种方式唱出。与选择单个口语单词相关的这种非常大量的信息表明，单词最好被视为次级符号，或初级符号的序列。让我们看看这种观点会将我们引向何处。

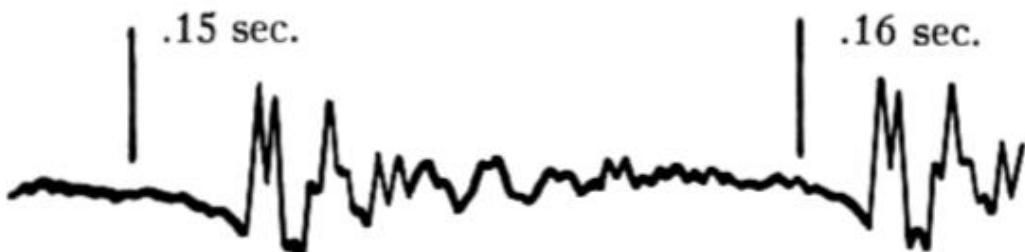


图 2

单词的实际物理体现由一个声学或电学扰动组成，可以表示为一个幅度-时间函数，如图 2 所示，它显示了一个语音的示波记录。这样的函数也是其他通信模式的典型，后面将更详细地讨论。因此，我们需要检查这样一个连续函数传递信息的能力。显然，在任何给定的时间间隔内，幅度可以按照无限多个这样的函数变化。这将意味着无限多个可能的次级符号，从而无限量的信息。然而，在实践中，所包含的信息是有限的，因为发送者无法完全精确地控制函数的形式，并且其形式的任何失真都倾向于使其与某些其他函数混淆。

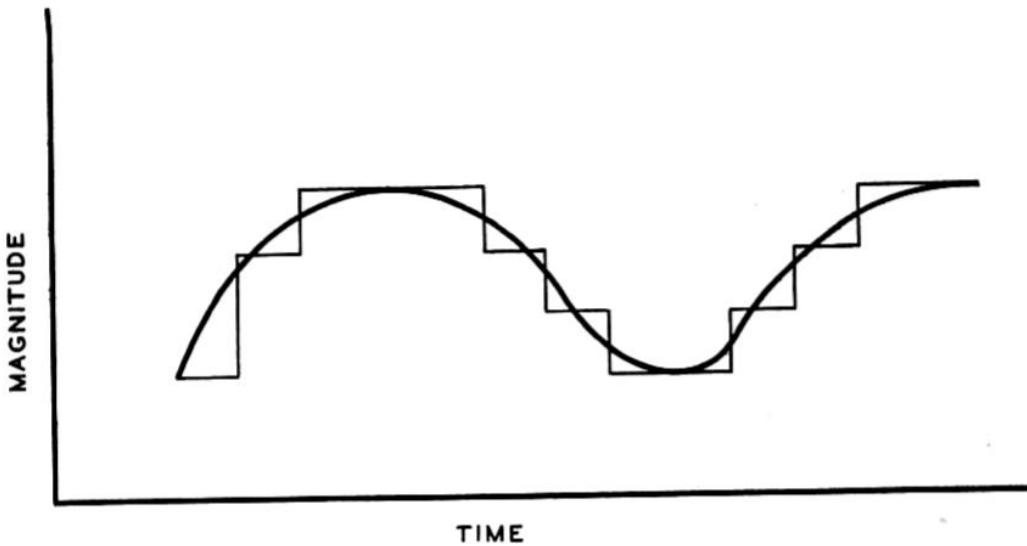


图 3

连续曲线可以看作是由连续阶梯组成的曲线在阶梯之间的间隔变为无穷小时所趋近的极限，如图 3 所示。一个不完美定义的曲线则可以看作是一个阶梯之间间隔有限的曲线。阶梯代表初级选择。有限时间内的选择次数是有限的。同时，每个阶梯上的变化被认为是限制在有限个值之一。这意味着可用符号的数量保持有限。如果不是这样，曲线将在每个阶梯处被完全精确地定义，这将意味着在任何一次阶梯处进行的观察将有可能在无限多个可能值之间进行区分。下面的例子可能有助于阐明离散选择与相应连续曲线之间的关系。我们可以想象一辆自行车配备了一种特殊类型的转向装置，只允许骑手将前轮设置在有限数量的固定位置。在这样的机器上，他试图骑行，使前轮遵循一条不规则弯曲的路线。他完成此任务的准确度将取决于他在调整转向机构之间走了多远，以及他能够将其设置的位置数量。

通过这种或多或少的巧妙设计，电话中使用的连续幅度-时间函数变得与电报中涉及的连续离散选择一样，可以接受相同类型的处理。

通信速率

到目前为止，我们已经推导出关于发送端符号信息含量的表达式，并且表明我们可以根据接收到的波形在多大程度上允许区分每次选择可用的各种可能符号来评估传输系统。接下来让我们考虑系统的失真如何限制能够确定地区分这些符号的选择速率。

符号间干扰的限制

我们假设系统不受外部干扰，并且其电流-电压关系是线性的。在这样的系统中，由于在电感、电容等电抗元件中存储能量及其随后的释放，传输波的形式可能会发生改变。为了评估这种失真导致无法正确确定可用符号中哪一个被选中的影响，我们可以从“符号间干扰”的角度来考虑这种失真。为了确定任何一次选择的结果，我们在该选择产生的扰动在接收端产生最大效应的时刻进行观察。叠加在这个效应上的将是一个扰动，它是所有其他符号的效应因系统中能量存储而延长的结果。这个叠加的合成扰动就是符号间干扰的含义。显然，如果这个扰动大于发送端选择时可用的两个值所产生的效应之差的一半，那么由其中一个值产生的波将被视为代表另一个。因此，成功传输的一个准则是：在任何情况下，符号间干扰不得超过发送端选择不同值时在接收端对应的波值之差的一半。

显然，影响任何一个符号的符号间干扰的大小取决于其前面的特定符号序列。然而，发送操作员总是可以通过他的选择，使得任何一次选择之前都发生导致最大可能干扰的那个序列。因此，每次选择必须与其前面的选择至少间隔某个确定的间隔，该间隔由最坏的干扰情况决定。如果使用比这更长的间隔，传输就会被不必要地延迟。因此，为了获得最大传输速率，选择应以恒定速率进行。乍一看，可能会认为在消息开始附近，由于引起干扰的前面符号较少，选择的间隔可以更短。然而，这假设系统之前是空闲的。实际上，前一个用户可能以导致最大符号间干扰的序列结束了他的消息。

与阻尼常数的关系

符号间干扰如何限制系统上的通信速率取决于特定系统的特性。所涉及的关系非常复杂，我们不会试图获得问题的完整或严格的解。然而，我们可以通过处理一个非常简单的案例来得出一个有趣的关系。考虑一个与电容串联的电阻。让一个端子连接到由大量内阻可忽略的电池单元组成的电池的一个端子。让另一个端子通过一个开关连接到电池。这个开关的排列使得通过按下 s 个键中的任何一个，电路端子可以沿着电池向上移动从零到 $s - 1$ 的任意多个电池单元。让发送操作员以固定的间隔从 s 个键中进行选择，并让接收操作员观察通过电阻的电流。进行此观察的最佳时间是按下键的瞬间，因为此时电流具有最大值。接收操作员需要做出的最细微的区分是区分由相差一个电池单元的电池变化产生的两个电流。两个这样的电流之差等于将一个电池单元引入电路时流过的初始电流。即

其中 E 是一个电池单元的电动势， R 是电路的电阻。

符号间干扰将包括所有先前符号产生的电流。任何一个符号的贡献将取决于其大小，即它所代表的增加电池单元的数量，以及它先于所讨论符号多长时间。对于给定的选择速率，这些贡献的合成结果对于这样一个特定的符号序列将是最大的：在该序列中，在所讨论的选择之前的每一次选择，操作员都选择了可能的最大符号，即 $(s - 1)E$ 的电压变化。那么接收电流的形式如图 4 所示，其中 A 代表受干扰的符号。这些曲线是针对 s 等于 5 绘制的。在时间零发生一次这种变化所产生的电流是

其中阻尼常数，

如果选择之间的间隔是 τ ，那么任何一条干扰电流在其对受干扰符号的干扰做出贡献之前被阻尼掉的时间是 $q\tau$ ，其中 q 是它先于受干扰符号的选择次数。因此，其贡献的大小由 (13) 得

如果我们将此表达式对 q 从 1 到无穷大的所有值求和，我们得到所有先前符号的综合效应，即符号间干扰。称之为 i_i ，

这显然随着选择间隔 τ 的减小而增加。如果这个间隔变得足够小，符号间干扰可能导致符号之间的混淆。由于这里的干扰总是一种符号（方向），只有当它变得与符号之间的最小差值 i_s 一样大时，才会引起混淆。令这两个量相等，我们从 (12) 和 (17) 得到 τ 的最小允许值，

在 t 秒内可以做出的最大选择次数 n 由下式给出

由 (18) 和 (19)

这里分子根据我们的信息度量是 n 次选择中包含的信息量，所以左侧是单位时间的信息量或通信速率。这等于电路的阻尼常数。因此我们得出结论，对于这个特定情况，可能的通信速率仅由电路的阻尼常数决定，并且与每次选择可用的符号数量无关。当然，这个数字越大，系统对外部干扰的影响就越敏感。

可能最接近这个理想化系统的实际系统是当以如此低的速度运行以至于其电感可以忽略不计时的无负载海底电报电缆。具有相当历史意义的是，开尔文勋爵对此类电缆的研究使他得出结论：电缆限制打点速度的程度由 $\$KR\$$ （总电容和总电阻的乘积）给出。如果他以允许速度的形式陈述他的结果，他本应得到这个量的倒数，这非常接近我们得出的作为通信速率度量的阻尼常数。然而，应该注意的是，他的考虑仅限于固定数量的符号，并未涉及这里在此数量与打点速度之间建立的关系。

更复杂的系统类似于刚才处理的简单情况，因为任何一个符号 $\$a\$$ 对任何其他符号 $\$b\$$ 的干扰的贡献，取决于系统在产生符号 $\$a\$$ 时施加的变化所引起的自由振动。这种自由振动，不是像刚才考虑的情况那样可以用单个指数函数表示，而可能是大量或多或少阻尼的振荡分量的合成，这些分量对应于系统的各种固有模式。任何一个符号的总干扰是这些复杂振动序列的合成结果，每个干扰符号对应一个。干扰的各个分量的瞬时值极大地取决于它们在特定观察时刻的相位，因此很难就总干扰的大小得出任何一般性结论。因此，同样难以就特定电路上的传输速率与可用符号数量之间的关系得出任何一般性结论。

与能量存储的关系

即使对于任何一个系统，都存在一个可用符号数量，使得通信速率大于任何其他数量，仍然可以就系统中的能量存储及其对传输速率的影响进行一个具有相当实际重要性的概括。

线性系统的每种固有振动模式都具有以下一般形式

其中固有频率 $\$omega\$$ 和阻尼常数 $\$alpha\$$ 是系统的特征，而振幅 $\$A\$$ 和相位 $\$theta\$$ 取决于激励条件。在这个表达式中，只要出现时间 $\$t\$$ ，它都乘以阻尼常数 $\$alpha\$$ 或频率 $\$omega\$$ 。因此，如果 $\$alpha\$$ 和 $\$omega\$$ 都改变，比如按比例 $\$k\$$ ，新系统中该振动模式的阻尼常数和频率都进行相同的变化，那么它们的合成结果，或者由一个符号建立的波，也将如此改变，使得任何特定值出现在时间 $\$t / k\$$ 而不是 $\$t\$$ 。再假设选择间隔 $\$tau\$$ 变为 $\$tau / k\$$ 。那么原来间隔时间为 $\$t_1\$$ 的任何两个符号将间隔 $\$t_1 / k\$$ 。干扰波在受干扰符号发生的时刻 $\$t_1 / k\$$ 的值将与它在原始系统中对应时刻 $\$t_1\$$ 的值相同。因此，该波对符号间干扰的贡献保持不变。由于这个关系适用于所有干扰符号，总的符号间干扰保持不变，因此可区分的可能符号数量也未改变。选择速率按比例 $\$k\$$ 改变，因此最大通信速率按与阻尼常数和固有频率相同的比例改变。

现在让我们考虑必须对系统进行哪些物理改变才能实现假定的各种模式的阻尼常数和固有频率的变化。以一个电感、电容和电阻串联的简单情况为例。这里我们有众所周知的关系

如果 $\$R\$$ 保持不变， $\$L\$$ 变为 $\$L / k\$$ ，则 $\$alpha\$$ 变为 $\$k \cdot alpha\$$ 。如果此外， $\$C\$$ 变为 $\$C / k\$$ ，则 $\$omega\$$ 变为 $\$k \cdot omega\$$ 。我们所做的是保持耗能元件 $\$R\$$ 不变，并改变两个储能元件 $\$L\$$ 和 $\$C\$$ ，改变的比例与通信速率改变的比例相反。对于更复杂的系统， $\$alpha\$$ 和 $\$omega\$$ 的表达式也相应复杂。然而，在所有情况下都会发现，如果所有耗能元件和储能元件都按照刚才考虑的简单情况进行处理，那么所有阻尼常数和固有频率都将被类似地改变。当涉及机械系统时，我们需要用电的机械等效物代替电阻，用惯性和顺性代替电感和电容。关于成比例地改变系统中的所有储能元件而不改变耗能元件，会导致可能的传输速率发生反向改变的这个概括，将在后面使用。

稳态与暂态观点

到目前为止，很少谈到频率，实际上也没有以我们将要陈述结果的意义上使用这个术语。我指的是将“频率”一词用于所谓的“稳态”下的交流电或其他正弦扰动。稳态观点已被证明在某些通信分支中非常有用，尤其是电话学。在过去的几年里，在建立稳态现象和我们刚才讨论的那种暂态现象之间的关系方面取得了很大进展。在继续主要论述之前，我将尝试用非数学语言来回顾这两种观点之间的相互关系。

顾名思义，稳态分析处理的是持续条件。如果在系统的发送端施加一个持续的正弦电动势，则在接收端会流过相同频率的正弦电流。接收电流与发送电动势的矢量比被称为系统在该频率下的转移导纳。理想情况下，假设驱动电动势从时间之初就开始作用，实际上，它已经作用了足够长的时间，以至于结果与理想情况下获得的结果无法区分。转移导纳的绝对大小给出了单位振幅的驱动电动势所产生的接收电流的振幅，其相位角给出了电流相对于驱动电动势的相位。表示此振幅和相位随频率变化的曲线构成了系统传输特性的稳态描述。对于一个没有能量存储的系统，例如只包含电阻的电路，转移导纳对所有频率都相同。振幅-频率曲线是一条水平线，其位置取决于电阻的大小和排列，而相位-频率曲线与频率轴重合。系统中的能量存储及其随后的释放导致导纳-频率曲线呈现其他形式。如果唯一的存储发生在无耗散介质中（当声波穿过开放空气时近似于这种情况），唯一的影响是使相位-频率曲线成为一条通过原点且斜率与介质中传播时间成正比的直线。其他形式的能量存储赋予导纳-频率曲线特定系统特征的形状。这些曲线的改变通常被称为频率失真。在大多数情况下，可以根据系统的储能和耗能元件的值相当容易地推导出它们的形式。这一事实使得系统的这种描述对于设计目的特别有用。

当然，这种物理描述只有在能够与系统执行其传输信息的主要功能的满意程度相关联时，才能作为性能的判据。在电话学的情况下，已经发现通过纯粹的经验方法来建立这种相关性是可行的。直到最近，仅考虑振幅-频率函数就已获得了足够的结果。随着使用的线路长度增加以及性能标准日益严格，也开始有必要考虑相位-频率函数。

在试图将这种方法扩展到电报学时，发现通过纯粹的经验方法来建立稳态特性与整体性能之间的相关性并不可取。其中一个原因是，关于系统整体性能与其暂态特性之间的相关性，已经积累了大量的信息。因此，稳态特性和暂态特性之间的相关性将提供一种手段，将这些经验信息应用于基于稳态的设备与系统设计。为了连接稳态和暂态现象之间的鸿沟，已经有了一个现成的桥梁，即傅里叶积分。这个积分可以被认为是一种数学构想，用于用稳态现象来表达暂态现象。它允许确定任何幅度-时间函数的一组无限持续正弦波的相对振幅和相位，这些正弦波的合成在任何瞬间都等于该时刻函数的幅度。正弦波的振幅是无穷小的，连续分量的频率彼此相差无穷小的增量。这些分量的相对振幅和相位作为频率的函数，构成了幅度-时间函数的稳态描述。

假设我们已知一个施加的暂态驱动力的幅度-时间函数，并希望获得接收电流的幅度-时间函数。我们推导驱动力的稳态描述，根据系统的已知导纳-频率函数修改其各个分量的振幅和相位，并得到表示接收电流稳态描述的振幅-频率曲线和相位-频率曲线。从这些曲线我们推导出表示接收波的幅度-时间函数。

然而，一个略有不同的观点得出的结果更符合我们测量信息的方法。我们可以应用刚才概述的方法来推导当施加的波仅由一个持续施加的电动势从某个值（可能为零）瞬间变化到与之相差一个单位的另一个值时所得到的幅度-时间函数。得到的波形是系统的特征，J. R. 卡森称之为阶跃导纳。我们可以将其视为系统的暂态描述。如果我们认为连续变化的施加波是由一系列阶梯形成的，我们可以将任何时刻的接收波视为一系列波的合成结果，每个波对应一个阶梯。每个波的波形是阶跃导纳的波形，其大小与特定阶梯的大小成正比，其在时间轴上的位置取决于特定阶梯或选择发生的时间。当阶梯变得无限接近时，对这些分量的求和就变成一个积分过程，通过该过程可以从施加函数准确地确定得到的幅度-时间函数。对于通信中涉及的未完全确定的波（其中阶梯的分离是有限的），对所有除了被观察选择之外的选择所产生的阶跃导纳曲线进行相应的求和，可以得到符号间干扰的度量。

还有另一个观点，虽然可能对当前问题没有直接应用，但有趣的是它从暂态角度揭示了系统稳态特性的意义。如果我们取施加波为一个数学上的脉冲，即持续无穷小时时间的扰动，我们发现其稳态分量的振幅对所有频率都相同。如果脉冲发生在零时刻，相位-频率曲线与频率轴重合；如果不是，它是一条通过原点的直线，其斜率与发生时间成正比。为了找到这种在零时刻施加的脉冲所产生的电流，我们将其稳态分量的恒定振幅-频率曲线乘以系统的振幅-频率曲线，并得到接收波的振幅-频率曲线，其形式与系统的振幅-频率曲线相同。类似地，我们将施加波的相位-频率曲线（在所有频率上为零）加上系统的相位-频率曲线，得到接收波的相位-频率曲线，与系统的相位-频率曲线相同。对应的幅度-时间函数给出了施加脉冲所产生的接收电流的瞬时值。因此我们看到，系统的稳态转移导纳与系统受到脉冲驱动力时接收到的波的稳态描述相同。一旦知道了这种接收波的形式，就可以通过假设施加波由无限多个无限接近的脉冲序列组成，其大小随时间根据给定的幅度-时间函数变化，从而推导出任何施加波产生的接收波。已经开发了积分这种无限脉冲响应序列效果以获得传输波的方法。

从这个回顾中可以看出，所谓的频率失真和暂态失真仅仅是描述传输系统中部分能量存储引起的波形变化的两种方法。

频率范围与时间乘积的意义

这种失真及其伴随的符号间干扰可能在系统设计中是不可避免的，也可能被故意引入。使用滤波器来获得多路复用操作（如在载波系统中）就是故意使用它的一个例子。考虑将如图 5 所示的低通滤波器引入一个原本无失真的传输系统所产生的影响。

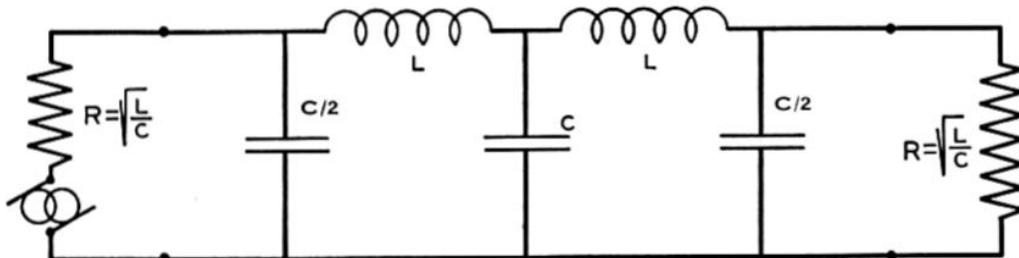


图 5

如果滤波器所连接的电路的阻抗近似为图中所示的纯电阻值，那么高于称为截止频率的临界值的稳态频率将被大大降低以致实际上可以忽略，而低于此值的频率则以很少的失真传输。对应于这种稳态失真的暂态失真必然导致符号间干扰；因此它限制了可区分符号的选择速率，即信息传输速率。

然而，这并不一定意味着，使用这样一个系统时的传输速率是传输受限于滤波器确定的频率范围的系统所能达到的最大值。可以设想，通过引入额外的储能元件，可以改变传输范围内的频率的转移导纳曲线，从而减少总的符号间干扰，从而允许更高的选择速率。通过这种方法可以确保的信息最大传输速率代表了对应于该频率范围的最大速率。

接下来让我们考虑这种可能的传输速率如何随滤波器的截止频率变化。滤波器设计理论告诉我们，如果我们以所需截止频率变化比例的倒数改变所有电感和电容，就可以改变截止频率而不改变所需的终端电阻。假设不仅对滤波器，而且对整个系统都进行这种储能元件的改变而不改变耗能元件。我们已经看到，这样的修改以储能元件变化比例的倒数改变传输速率；在当前情况下，即与截止频率变化的比例成正比。新的速率是新的频率范围内的最大值，这一点当我们考虑到新系统的转移导纳曲线与其截止频率的关系与原始系统中的关系相同时是显而易见的。

这使我们得出一个重要结论：对于一个传输被限制在有限范围内的频率的系统，其可能的最大信息传输速率与该频率范围的宽度成正比。由此可知，可以通过这样一个系统传输的信息总量与系统传输的频率范围的宽度及其可用于传输的时间的乘积成正比。传输频率范围与可用时间的乘积是我在讨论开始时提到的用于比较传输系统的定量标准。这个标准的意义或许最好通过将其应用于一些典型情况来体现。

使消息适应线路

为了便于讨论，似乎有必要引入和解释几个术语。为了传输一系列符号，可能有各种可用的媒介，例如有线线路、空气路径（如直接语音）或以太（如无线电通信）。为了方便起见，我们将所有这些归在“线路”这个通用名称下。每种这样的媒介通常以一定的频率范围为特征，在此范围内传输可以进行，且失真和外部干扰相对较小。这将被称作“线路频率范围”。类似地，对应于各种通信模式（如电报和电话）的符号序列将被指定为“消息”。每个消息通常将具有一个“消息频率范围”。这可以被认为是这样确定的：即恰好能满意地传输该类消息的线路的频率范围；或者我们可以将其视为频率尺度中为允许区分传输波中出现的各种符号而必须保留消息波的稳态分量的那部分。

当我们建立实际的通信系统时，经常发现消息频率范围和线路频率范围在大小和频率尺度上的位置都不重合。那么，如果我们要充分利用线路的传输容量，就必须引入改变消息所需频率范围的手段。有两种这样的手段可用，它们共同提供了理论上实现使消息频率范围适应可用线路频率范围的预期目标的可能性。

广泛用于无线电系统和有线载波传输的调制过程，使得将任何消息的频率范围转移到频率尺度上的新位置而不改变其宽度成为可能。这立刻从以下众所周知的事实得出：由载波被符号波调制所产生的波的稳态描述包括一对边带，每个边带中都包含一个对应于原始波每个稳态分量的分量。边带中每个分量的频率与载波频率相差符号波对应分量的频率。消除其中一个边带会产生一个波，它保留了原始符号波所体现的信息，并且占据一个与原始波宽度相同但位移到由载波频率确定的新位置的频率范围。在载波操作中，这些位移消息之间必须允许的间隔取决于可用于分离它们的滤波器的选择性。实际滤波器的缺陷倾向于使得可以传输的消息频率范围小于消息所占据的线路频率范围。线路用于传输给定信息量的时间与传达该信息的消息持续时间相同。因此，消息的频率范围与时间的乘积之和总是小于或等于线路频率范围与时间的相应乘积之和。

如果可用线路范围小于消息范围，例如试图通过海底电报电缆传输语音的情况，只要有足够多的线路可用，仍然可以实现传输。通过合适的滤波器，消息波可以被分离成多个波，每个波由原始波中那些位于不大于线路范围宽度的部分消息范围内的分量组成。消息的这些部分中的每一个都可以通过调制转移到线路的频率范围内，并通过单独的线路传输。在接收端进行逆过程恢复原始消息。

虽然在理论上，如果有足够的消息和线路，可以通过调制和消息频率范围的细分使消息范围适应线路范围，但这并不总是实际的。有时更可取的是利用前面提到的第二种变换方法。这包括记录符号序列并以不同的速度再现它以获得用于传输的波。用于发送电报消息的纸条可以这种方式使用。这里符号序列代表一系列次级符号的选择。这些选择以操作员方便操作纸条穿孔机键的速率进行。纸条上的孔施加到线路上的电波代表相应的初级符号序列。这些初级符号施加到线路上的速率由纸条再现时的速度决定。由于对于给定数量的不同初级符号，所需的频率范围与选择速率成正比，显然，从纸条再现的消息频率范围可以被调整为适应任何可用的线路频率范围，至少就范围宽度而言是如此。

当然，可能需要进行调制以使消息范围到达频率尺度的适当部分。再现涉及给定选择次数的消息所需的时间与纸条再现的速度成反比，因此也与再现序列所需的频率范围成反比。因此，再现消息的频率范围与时间的乘积（这也是线路所需产品的乘积）与再现速率无关，仅取决于消息原始形式的信息含量。

如果可用线路范围需要以显著提高的速度进行再现，单个操作员无法方便地持续为发送设备提供纸条。然后可以采用多路复用操作，其中线路由各个操作员轮流使用。有趣的是，这种分配器式多路复用利用线路频率范围的效率与使用相同打点速度的单路打印电报信道相同，并且比载波多路复用方法的效率更高。通过分配器方法，每个操作员在他分配的时间内使用线路的全部频率范围，并且没有时间浪费在从彼此分离信道上。另一方面，在载波多路复用中，虽然每个操作员在可用时间内一直使用线路，但由于物理滤波器与理想情况的偏离，一部分频率范围被浪费在信道分离上。而且，在电报中通常传输双边带，这种情况下载波方法需要更大的线路频率范围。

如果消息最初是作为连续时间函数产生的，如语音中那样，可以通过用唱片记录代替纸条来使用相同的方法。当我们考虑到一个不完美定义的波等价于一系列有限阶梯，或者一个完美定义的波等价于一系列无穷小阶梯时，这里所需的线路频率范围与再现速度成正比，与再现时间成反比也是显而易见的。从稳态的观点来看，所有分量的频率都以记录和再现速度的比例改变，因此它们占据的范围也按相同比例改变。

因此我们看到，对于所有通过幅度-时间函数进行的通信形式，可传输信息量的上限由各种可用线路的每条线路频率范围与其可用时间的乘积之和所设定。

应用于图片传输

然而，如果为了充分利用线路频率范围我们引入了记录过程，我们的消息在整个传输过程中就不再作为幅度-时间函数存在，而是变成了幅度-空间函数。同样，在图片传输的情况下，要传输的信息最初就是以幅度-空间函数的形式存在的。当然，我们可以将唱片或图片视为次级符号，并说传输的信息包括发送者选择他希望引起接收者注意的特定唱片或图片。这种选择所涉及的信息量则由他可能选择的不同唱片或图片数量的对数来度量。那么问题就是将构成次级符号的幅度-空间函数分析为一系列初级符号。这可以按照已经用于幅度-时间函数的类似方式完成。

唱片的情况与我们已考虑的那些直接类似，因为幅度是沿单条直线距离的函数。因此，这个距离类似于时间，信息含量可以像从空气振动的压力-时间曲线中得出那样准确地找到。另一方面，在图片中，涉及到两个维度。然而，我们可以通过将面积分成一系列等宽的条带，将其简化为一维，就像在图片电传输中使用的扫描孔径所做的那样。图6显示了这个扫描机制。

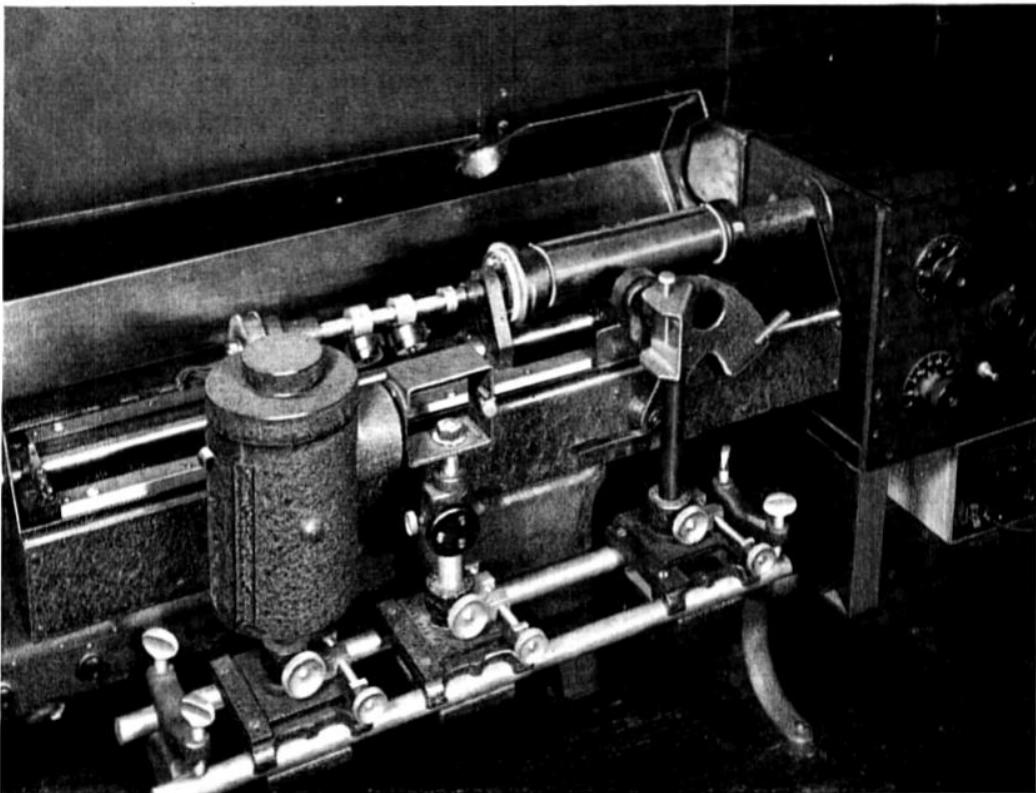


图 6

图片安装在一个旋转圆柱上，每转一圈，它被螺旋丝杠向前推进一个条带的宽度。这个扫描操作相当于在垂直于条带的方向上进行任意多次选择。这些选择的次数决定了该方向上的分辨率程度。如果两个方向上的分辨率要相同，我们可以认为沿条带的幅度-距离函数由每单位长度相同次数的选择组成。那么初级选择的总数将等于图片被这样划分成的基本方格的数量。这些基本区域在它们的平均强度上彼此不同。在再现图片的每个基本区域中可以正确相互区分的不同强度数量代表每次选择可用的初级符号数量。因此，图片的总信息含量由基本区域数乘以可区分强度数的对数给出。

在实际图片中，沿我们所谓的扫描线的强度作为距离的函数是一个明确的连续函数，但如果再现的图片有任何模糊，这个函数就会失去一些明确性。这种模糊可以被视为一种符号间干扰，因为失真图片中某一点的强度取决于原始图片中相邻点的强度。这种失真与由于能量存储在幅度-时间函数中发生的符号间干扰的相似性表明，图片失真也可以基于稳态进行处理。我们可以将代表图片的幅度-距离函数分析为持续分量，在每个分量中，强度是距离的正弦函数。我们可以用通过电影胶片记录和再现语音的机制来可视化这样的单个分量。显影后胶片透射的光的强度沿其长度根据语音声音产生的电波的大小而变化。如果语音波被持续的交流电取代，胶片上就会出现强度随距离的正弦变化。连续最大值之间的距离，即波长，将与应用交流电的频率成反比。图7显示了这样一个语音波和两个不同频率的正弦波的记录。这些变化叠加在一个均匀分量上，以避免负光的困难。

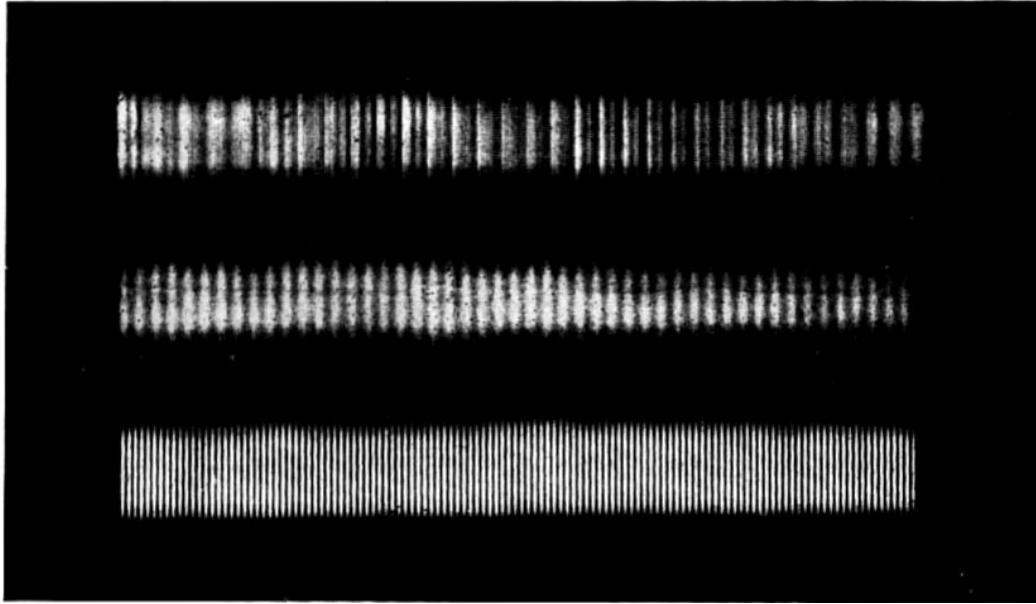


图 7

交流电的频率定义为单位时间内它执行的完整周期数。在相应的交替空间波中，频率的类似物因此是单位距离内执行的完整周期或波的数量。这是波长的倒数，就像频率是周期的倒数一样。由于物理学家已使用波数这个术语来表示波长的倒数，我将用这个术语来表示在幅度-距离函数的稳态分析中对应于频率的量。因此，图片在传输过程中遭受的失真可以用作为波数函数的稳态振幅和相位失真来表示。正如传输给定数量的信息需要给定频率范围与时间的乘积一样，在图片中保存给定数量的信息也需要相应的波数范围与距离的乘积。举例来说，考虑在不改变其细节或强度辨别精细度的情况下放大图片的效果。假设放大分两步进行。第一步，水平尺寸增加，垂直尺寸保持不变。让扫描条带沿水平方向运行。如果我们考虑代表任何水平条带上变化的幅度-距离函数，放大的效果是按线性尺寸增加的比例增加每个稳态分量的波长。因此，每个分量的波数按此比例减小，波数范围也按相同比例减小。条带波数范围与其长度的乘积保持不变，所有条带（即整个图片）的乘积之和也保持不变。第二步包括在固定水平尺寸的情况下增加垂直尺寸。在这种情况下通过考虑扫描条带沿垂直方向运行，可以立即得出波数范围与距离的乘积在此操作期间也保持恒定。

由于传输的信息在电形式下由频率范围与时间的乘积度量，在图形形式下由波数范围与距离的乘积度量，我们预期当诸如图片或唱片等记录转换为电流或反之亦然时，两者的相应乘积应相等，而与再现速度无关。这很容易证明。设 v 为记录器或再现器相对于记录移动的速度。设记录的波数范围在极限值 w_1 和 w_2 之间。如果我们考虑距离函数的任何一个分量，其波长为 λ ，再现器遍历一个完整周期所需的时间为 λ/v ，或 $1/vw$ 。这是时间波对应分量的周期，所以后的频率 f 是这个的倒数，即 vw 。因此，频率范围由下式给出

如果 D 是记录的长度，那么再现它所需的时间是

由此可得

这表明两个乘积在数值上相等，与速度无关。

应用于电视

由于我们的第一个例子来自最早形式的电通信之一——海底电缆，那么最后一个例子也许适合用可能是最新形式的——电视。这里要传输的信息最初以幅度形式存在，该幅度是空间和时间的连续函数。为了确定保持远处场景恒定视图所需的线路设施，我们希望确定所需的线路频率范围。我们知道这由单位时间内要传输的总信息量来度量。

在最成功的电视系统中，其方法类似于电影，即向观察者呈现一系列场景的单独再现，并依赖视觉暂留将间歇性照明转换为外观上随时间连续的变化。确定所需频率范围的第一步是确定场景连续视图中的单个视图的信息含量。这可以像静止图片一样准确地确定。所需的基本区域分辨率和每个区域内强度再现的所需精度确定了一个有效的选择次数和每次选择可用的初级符号数量。这些确定了一个波数范围与距离的最小乘积。这反过来又等于传输场景的单个视图所必须可用的线路频率范围与时间的乘积。可用时间由以下事实设定：如果连续图片之间的间隔超过大约十六分之一秒，闪烁就会变得令人讨厌。因此，我们只需将单张图片的波数范围与距离的乘积除以十六分之一，即可得到保持连续视图所需的线路频率范围。

在刚才得到的结果中，一个重要的因素是防止闪烁所需的间隔。然而，闪烁倾向是特定传输方法的结果。如果能够实际消除这个因素，所需的频率范围可能会有所不同。例如，我们可以设想一个更像直接视觉的系统，其中代表每个单独基本区域强度变化的幅度-时间函数通过独立的线路传输，并用于产生再现场景相应区域的连续变化照明。那么，任何一条独立线路上所需的频率范围将由以下因素决定：即任何瞬间的强度可以被来自邻近时间光强度的符号间干扰所允许失真的程度；也就是说，所需的频率范围取决于一种时间上的模糊，类似于用于为单张图片设置波数范围的空间模糊。对于这样的系统，所需的总频率范围似乎可能比将闪烁作为因素的系统要小一些。

结论

在本次讨论开始时，我提议建立一个定量标准，用于比较各种系统传输信息的能力。这个标准已被证明是稳态交流电流以明显均匀效率传输的频率范围的宽度与系统可用时间的乘积。虽然最方便的操作方法并不总是充分利用线路的频率范围（如双边带传输的情况），但将实际使用的频率范围与基于所传输材料实际信息含量所需的范围进行比较，可以了解通过在终端设备的便利性或成本上做出牺牲，在线路成本方面可以获得什么。最后，所发展的观点是有用的，因为它提供了一种便捷的方法来检查针对复杂系统传输可能性提出的主张是否在物理可能的范围内。为此，我们对系统声称要处理的每条消息，确定其频率范围与时间的必要乘积，并将所涉及的所有消息的这些乘积相加。同样，对每条线路，取其传输频率范围与其使用时间的乘积，并将这些乘积相加。如果这个和小于消息的相应和，我们可以立即断言该系统是不可行的。

专业术语中英对照表

英文术语	中文翻译
Information	信息
Transmission	传输
Quantitative measure	定量度量
Steady state	稳态
Transient	暂态
Frequency-range	频率范围
Damping constant	阻尼常数
Symbol	符号

英文术语	中文翻译
Primary symbol	初级符号
Secondary symbol	次级符号
Selection	选择
Distortion	失真
Intersymbol interference	符号间干扰
Storage of energy	能量存储
Linear system	线性系统
Admittance	导纳
Transfer admittance	转移导纳
Amplitude-frequency curve	振幅-频率曲线
Phase-frequency curve	相位-频率曲线
Fourier Integral	傅里叶积分
Indicial admittance	阶跃导纳
Cut-off frequency	截止频率
Filter	滤波器
Low pass filter	低通滤波器
Modulation	调制
Carrier	载波
Side-band	边带
Line	线路
Message	消息
Multiplex operation	多路复用操作
Scanning	扫描
Wave-number	波数
Magnitude-time function	幅度-时间函数
Magnitude-space function	幅度-空间函数
Picture transmission	图片传输
Television	电视
Flicker	闪烁
Resolution	分辨率
Baudot System	波多系统
Submarine telegraph cable	海底电报电缆