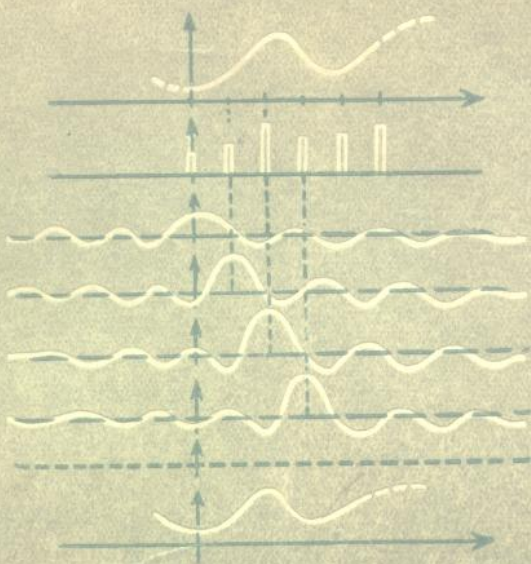




苏联 A. A. 哈尔凯维奇著

# 通信论简述

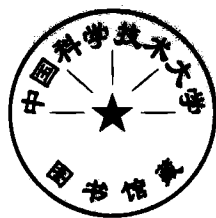
人民邮电出版社

# 通 信 論 簡 述

苏联 A. A. 哈尔凱維奇著

張 煦 譯

刘 侃 錢尙平 校



人 民 郵 電 出 版 社

2P56/35

А.А.ХАРКЕВИЧ  
ОЧЕРКИ  
ОБЩЕЙ ТЕОРИИ  
СВЯЗИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1955

本書將信息論和通信統計論所包含的概念，作了較有系統的敘述。這種理論是電信工程的基礎，可用來分析通信的最基本問題：提高通信有效度和提高通信可靠性的問題。

這本書可供在電信方面（不論有錢或無錢），以及在遠距測量和遠距控制方面工作的工程師和研究人員作參考之用。

本書由成都電信工程學院張煦教授擔任翻譯，並由該院劉侃副教授和上海電信局錢尙平工程師擔任校對。

通 信 論 簡 述

|        |                                        |
|--------|----------------------------------------|
| 著 者：   | 蘇聯 А. А. 哈 爾 凱 維 奇                     |
| 譯 者：   | 張 煦                                    |
| 校 者：   | 劉 侃 錢 尙 平                              |
| 出 版 者： | 人 民 郵 電 出 版 社<br>北京東四區6條胡同13號          |
| 印 刷 者： | 人 民 郵 電 出 版 社 南 京 印 刷 廠<br>南京太平路戶部街15號 |
| 發 行 者： | 新 華 書 店                                |

1957 年 5 月南京第一版第一次印刷 1—2,369册  
850×1168 1/32 120頁印張 $7\frac{1}{32}$ 印刷字數180千字定價(11)1.60元

★北京市書刊出版業營業許可証出字第〇四八號★

統一書號· 15045· 總611—有108

## 序

這本書称为“簡述”，是因为通信論的發展还不能認為完整。書中所能闡明的也因此限于不連續的片斷。还有很多問題需待解决，讀者可以在書中找出一系列比較明顯的課題，來進一步研究。

這本書寫得很簡短。我为了使这一理論的實質能突出，便沒有將次要的、繁瑣的部分詳細敘述。

通信論是比較新的；新的概念需要新的名詞術語。但是我充分了解自己的責任，所以不准备从事于一系列名詞術語的介紹。書中沒有为任何名詞術語作辯护性的說明，而只是尽可能选用俄語中簡單而明确的字彙。

对評閱者H.A.热列雷茲諾夫和編輯M.A.卡拉簫夫，表示衷心感謝。

A.A. 哈尔凱維奇

1954年5月于莫斯科

# 引 言

通信論（即通信的通用理論），是在最近期間建立的，并已發展成為一門獨立的理論科學。這是由于：一方面，在通信的理論和工程領域內存在大量累積起來的、并等待綜合的各種知識；另一方面，有必要解決日益複雜的各種通信問題，這些問題在以前是沒有適當的解決方法并且甚至是沒有解決的可能性。

通信論的作用，同任何一般性的理論科學一樣，是借助于一般通用的方式來提出和解決基本問題。通信論不僅可以探討過去在通信工程領域中獲得的成就，而且可以指出在發展方向中應注意的問題。另一方面，在很多情況下，通信論可足夠清楚地指出：那些可以达到，那些是不能達到的。

開始述說通信論時，首先要將通信論的界限劃清。目前，對通信論已作了多方面的研究，并且引起了廣泛的興趣。通信論有時亦叫做信息論。在國外，信息論這一名稱特別流行，但是由於企圖將這一理論的原則擴大到它尚未能勝任的領域內，所以信息論這一名稱在國外具有不尽相同的含義。通信論亦常稱為通信的統計論。實際上，在新理論的研究中引用通信的統計理論雖然是新理論的特點，但是通信論亦研究另一些不屬統計性質的問題。

明確研究對象是必要的；以後通信論可看成是通信工程的理論基礎。通信論的這一含義也就決定了通信論的作用和問題的性質。

通信就是傳輸消息（這裡談的借助于某一種信號來實現的通信，主要是指電的通信）。

擺在通信工程面前的所有問題，可以歸結為兩個基本問題。第一個基本問題是通信有效度的問題。這問題是怎樣以最經濟的方法

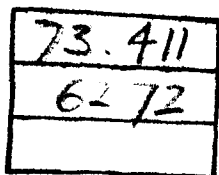
傳輸最大數量的消息。通信論說明“經濟性”對通信有莫大的特殊意義；通信論建立了消息的量度，作為通信的對象；利用通信論能比較各種通信系統的有效度；通信論指出可借以進一步提高有效度的各種潛在可能性。

第二個基本問題——通信可靠性的問題。由於干擾的影響，收得的消息並不與發送的完全相同。可靠性是一種量度，用來表示收得的消息與發送的消息相符合的程度。在一定的通信情況下，即在一定的干擾情況下，可靠性依賴於通信系統的性能，依賴於通信系統抵抗干擾有害作用的能力。通信系統的這種性能稱為抗擾性。利用通信論可比較各種通信制度的抗擾性，同時通信論又指出提高抗擾性的一般方法。

有效度問題和可靠性問題是通信的基本問題。通信論的內容就是分析和解決這些問題。必須注意，有效度和可靠性的要求是矛盾的。這種矛盾在工程上常遇到；通信論可以幫助尋求適當的折衷辦法。

應當看到，通信論雖然發展得很快，但是這一理論的基本結構還不很完整。特別應該注意，直到現在，還缺乏象守恆定律類型的基本定律系，而這些定律是衡量各知識部門已否奠定理論基礎的特征。通信方面專門的這類定律的存在，是可以直接覺察到的。不過，這些定律還未發現因而也還沒有形成。

期待於通信論的，常常多於它所能給的。一般以為通信論包含任何具體問題的解答，但實際上當然並非如此。通信論是對設想方式建立一定的體系，預指實踐活動的方向，但并不直接給出結果。換句話說，為了使通信論能取得良好效果，就要求在通信領域中進行新的研究工作的工程師們，必須掌握這一理論。很明顯，為此必須普遍介紹通信論的知識，這也就是編寫本書的目的。



# 目 录

序

引 言

## 第一章 基本概念

|                 |        |
|-----------------|--------|
| § 1. 通信         | ( 1 )  |
| § 2. 通信系统       | ( 3 )  |
| § 3. 通信线路和通信电路  | ( 4 )  |
| § 4. 消息和信号      | ( 5 )  |
| § 5. 离散的消息      | ( 6 )  |
| § 6. 计数制度       | ( 6 )  |
| § 7. 编码及其单元     | ( 8 )  |
| § 8. 调制         | ( 10 ) |
| § 9. 连续的消息      | ( 11 ) |
| § 10. 分层        | ( 16 ) |
| § 11. 信息数量      | ( 18 ) |
| § 12. 信号的物理特性   | ( 21 ) |
| § 13. 信号和通路     | ( 23 ) |
| § 14. 信息数量和信号体积 | ( 24 ) |
| § 15. 通信系统的传输能力 | ( 27 ) |
| § 16. 利用编码以变换信号 | ( 30 ) |
| § 17. 信号体积的变换   | ( 32 ) |
| § 18. 几种通信方式的比较 | ( 36 ) |

## 第二章 通信的统计理论

|                 |        |
|-----------------|--------|
| § 19. 概率论中的若干定义 | ( 40 ) |
| § 20. 最佳的不均匀编码  | ( 46 ) |

|                        |         |
|------------------------|---------|
| § 21. 連續的不均勻編碼         | ( 48 )  |
| § 22. “白噪声”            | ( 52 )  |
| § 23. 信號的概率特性          | ( 57 )  |
| § 24. 在消息單元的概率不等時的信息數量 | ( 62 )  |
| § 25. 信息數量和概率分布        | ( 65 )  |
| § 26. 多余性的概念           | ( 70 )  |
| § 27. 消息單元互相依賴時的信息數量   | ( 73 )  |
| § 28. 多余性數量的確定         | ( 75 )  |
| § 29. 最佳的概率分布          | ( 77 )  |
| § 30. 概率分布的變換          | ( 82 )  |
| § 31. 利用延長法解除信號關聯      | ( 85 )  |
| § 32. 預測法              | ( 91 )  |
| § 33. “ $\Delta$ -調制”  | ( 101 ) |
| § 34. 縮減電話信號的可能性       | ( 104 ) |

### 第 三 章 干 擾 的 遏 制

|                     |         |
|---------------------|---------|
| § 35. 引言            | ( 108 ) |
| § 36. 調幅與調頻的比較      | ( 112 ) |
| § 37. 累積法           | ( 116 ) |
| § 38. 周期性信號的濾過      | ( 119 ) |
| § 39. 同步的累積         | ( 123 ) |
| § 40. 關聯的收信法        | ( 129 ) |
| § 41. 修正的編碼         | ( 132 ) |
| § 42. 信號的幾何表示       | ( 137 ) |
| § 43. 通信系統的幾何模型     | ( 141 ) |
| § 44. 抗擾性的通用理論      | ( 142 ) |
| § 45. 抗擾性密度         | ( 145 ) |
| § 46. 抗擾性的限度        | ( 149 ) |
| § 47. 傳輸能力有關定理的幾何證明 | ( 156 ) |

## 第四章 划分信号的理論

|                   |         |
|-------------------|---------|
| § 48. 引言          | ( 161 ) |
| § 49. 頻率划分和時間划分   | ( 163 ) |
| § 50. 相位划分        | ( 165 ) |
| § 51. 波形划分        | ( 166 ) |
| § 52. 电平划分        | ( 170 ) |
| § 53. 組合的划分       | ( 173 ) |
| § 54. 綫性划分的通用理論   | ( 176 ) |
| § 55. 划分的几何表示     | ( 182 ) |
| § 56. 綫性互不依賴信号的划分 | ( 184 ) |
| § 57. 划分设备的綜合     | ( 191 ) |

## 補 充

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| 1. 柯捷里尼可夫定理的补充說明 (对 § 9 ) | ( 195 ) |
| 2. 莫尔斯編碼和統計 (对 § 20 )     | ( 197 ) |
| 3. 莫尔斯編碼的关联函数 (对 § 23 )   | ( 199 ) |
| 4. 極值分布的求解 (对 § 25 )      | ( 201 ) |
| 5. 信号差的概率分布 (对 § 32 )     | ( 204 ) |
| 6. 凝聚性和关联 (对 § 37 )       | ( 206 ) |
| 7. 最佳的濾过 (对 § 38 )        | ( 207 ) |
| 8. 非同步的累積 (对 § 39 )       | ( 209 ) |
| 9. 二進制信号的关联收信 (对 § 44 )   | ( 212 ) |
| 10. 迭合脈冲的划分 (对 § 49 )     | ( 214 ) |

## 附 錄

|                                                                     |         |
|---------------------------------------------------------------------|---------|
| 1. $\varnothing(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz$ 函数表 | ( 220 ) |
| 2. $\frac{\sin x}{x}$ 函数表                                           | ( 222 ) |
| 3. 二進制对数表 (負值), 从 0.01 至 0.99                                       | ( 225 ) |
| 4. 二進制对数表, 从 1 至 99                                                 | ( 225 ) |

## 譯 名 索 引

## 参 考 書 刊

# 第一章 基本概念

## §1. 通 信

通信是將消息<sup>1)</sup>从發信者傳送至收信者。这里，僅討論一種通信方式——電信。電信就是利用電的信號來傳遞消息，而電的信號用導綫傳輸，或者不用導綫而以電磁波的形式在空間傳輸。

通信系統就是傳輸系統。不過，这里應該隨即確定，傳輸的客體倒底是什麼？从發信者送到收信者的是什麼東西？在電力傳輸系統中，傳輸的客體是電能，傳輸時電能的耗損應該很小。在通信系統中，傳輸的客體却不是能量，而是消息。當然傳輸消息時必然伴隨着能量的傳輸，但通信系統的目的畢竟不是傳輸能量。如所周知，通信系統——例如無線電信——傳輸能量的效率極低。所以，為了估量通信系統的有效度，應該有特殊的、通信專用的准則。要建立這種准則，必須確定消息是什麼，并給以數量的表示。

消息中包含的信息<sup>2)</sup>數量可用來作為這種數量的比較准則。關於信息數量的確定，以後將詳細討論，現在只作一般說明。

首先考慮各種電信方式中最早的一種——電報。在電報中，消息是由文字表達的。消息中包含的信息數量，可以用字數來計量。這樣的計量方法是很早的，並且在電報中採用是最自然和方便的。不過，很遺憾，它並不適用於所有的通信。其次，再看電話。这里，信息數量不單是決定于字數，因為收信人還从自然話音中的音調和節奏取得信息。傳真電報也是如此，它不僅傳送文字，而且傳送手

1) 消息——Сообщение.

2) 信息——Сведения.

寫文件，及伴隨着文字的圖畫。最后，我們來看電視的通信方式，很明顯，電視圖影所包含的信息數量，應該按完全不同的方式來決定。但是，如果我們簡單地把所傳輸的都叫做消息，則不論是電報的電文，傳真電報的稿紙，人的話音，或是電視圖影，都是消息。

通信理論的基本原則之一，就是不論何種消息中包含的信息數量應都可用某種通用性的方法來計量。

如果認為這種通用的計量方法是可能的，那就能够建立公共准則，以表示通信系統的有效度。在單位時間內通信系統可能傳輸的信息數量，可以用作有效度指標之一，並稱為通信系統的傳輸能力。

可是，應該指出，任何實際的通信系統都是在有各種干擾的情況下工作的，這些干擾將使傳輸的消息失真，或者甚至使消息不可能被接收。所以，對於通信系統，除了有效度以外，還要提出通信可靠性的要求。通信的可靠性，是衡量收到消息的真實性的量度，也就是衡量收到的消息是否與發出的消息相符合的量度。通信的可靠性，一方面依通信系統的運用情況，也就是依干擾的性質和強度、信號的傳播情況及設備的技術正確性而定，另一方面，還依通信系統本身的性質，也就是依信號傳輸的方法（調制方法和編碼結構）而定。通信系統抵抗系統本身的干擾的能力，稱為抗擾性。以後我們僅討論通信系統的抗擾性，而不管其餘影響通信可靠性的因素。

在這樣一般性的情況下研究通信問題，自然會得出極一般性質的結論。這些結論不僅可應用到通信本身，還可以應用到其他場合，特別是遠距控制和遠距測量。但是，以後的討論將限于通信論在電信上的應用。

上述論據就是我們建立通信論的基礎，所以我們將逐步深入地討論。

## §2. 通信系統

一般，電信是按下列方法進行的。發信者發出消息，這消息送至發信設備。在發信設備中，消息應該轉換為電的信號。信號並不是消息，但消息與信號之間應該有單一的相應關係，以便信號在收信端可以再度轉換為消息，並且與發送的消息相同。將信號還原為消息的工作，是由收信設備完成的。

例如，電報的電文（消息）由發送端的電報機（發信設備）轉換為一定序列的電流脈沖（信號）。這些脈沖到了收受端，使印字機（收信設備）動作，將信號還原為電文。

當然，在理想情形，收得的消息應該與發送的相同。但是實際上是有失真的，失真的程度決定通信的可靠性。

發信設備和收信設備之間用通信綫路連接起來。綫路可以是一對導綫，或者是發信機與收信機間的電磁波傳播的區間（無線電通信就是如此）。加在收信設備上的，不僅是發信設備所發送的信號，並且還有干擾。干擾可能是從外界來的，亦可能是在內部產生的（例如電子管噪聲）。但是，為了一般的考慮，把干擾來源合併為一，較為方便些。

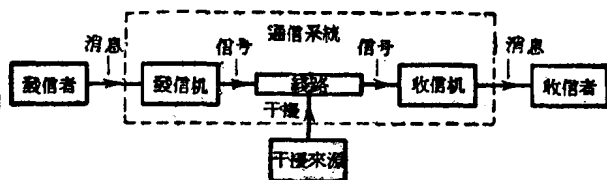


圖 1.

根據上面的敘述，可以用圖 1 來表達通信系統。必須注意，發信者和收信者並不包括在通信系統之內。這樣，通信系統的定义就是傳遞消息所需技術設備的總和（發信設備，綫路和收信設備）。

### § 3. 通信綫路和通信电路

通信技术在最初階段就具有力求加大通信系統傳輸能力的特點。通信系統的設備成本是高的，只要舉出几千公里長的通信綫路的導綫（架空明綫或電纜）的費用，就足可說明這一問題。所以，產生了复用通信綫路的想法，力圖使導綫得以更有效地利用。一種可能的辦法是在一對導綫上同時傳輸幾個消息。在這種情形，每一消息有它自己的通信电路<sup>⊖</sup>。這種通信稱為多路通信。在收受端，信號再行划分，分別變換為消息。這樣，所謂通信电路，就是保證該路通信獨立傳輸所需技術設備的總和。一對實綫綫路上的电路數目可能很多，以十計量，甚至以百計量。

圖 2 是多路通信系統簡圖。為了要從綫路上傳輸的聯合信號中分出某一通路的信號，必須採取划分（選擇）的方法。因此，圖上綫

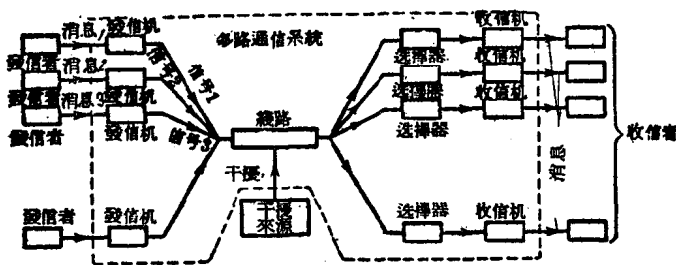


圖 2.

路的輸出端連接有許多划分設備（選擇設備），並且將各收信設備分接在每一划分設備的後面。為了使多路信號有划分的可能，各個通路的信號必須有一定的物理標誌，以示區別，使得划分設備能依據這個標誌對需要的信號起反應，而對所有其他信號不起反應。為達到划分目的所必需的条件，可用划分（選擇）理論說明。划分理論

⊖原文为 Канал связи 以后簡稱為通路。一譯者註

的基礎，將在後面敘述。現在只指出划分有各种不同的方法，但近代通信技术中只采用了其中的一部分。

关于多路通信，还必须指出其中会出现新的干扰形式，即出现由于划分方法不完善所引起的鄰近通路的干扰。由于鄰近通路感应过来的信号不是需要的信号，所以称为干扰。

#### § 4. 消息和信号

上面兩節，簡單地談了一下起主要作用（傳輸消息）的設備的性質。現在將討論傳輸的客體——消息，以及消息怎样轉換成信号。

上面已經有過定義：消息是正待傳輸的，而信号是代表消息的一種電的振動。

從消息轉換為信号，包含三個步驟，它們可以各別進行，亦可以混合一起進行。這三個步驟是：交換，編碼，調制。

所謂交換，簡單地說就是將原始消息的非電量值交換為電的量值。例如電話，就是利用送話器把說話時聲音壓力的變化交換為相應的電流變化。在傳送圖象時，狹細的光綫掃描在圖象上，反射至光電管，將光強的變化交換為相應的電流變化。在這兩個例子中，發話器和光電管是將原始消息的變化（聲音壓力和光綫強弱）交換為電的量度（電流或電壓）。對於這類交換設備的一般特性，通常只要求它們是綫性，也就是說作用與響應須成正比例\*。如果在信号形成過程中還須附加個別交換步驟，則在這種情況下，我們仍把已交換為電振動的消息，逕稱為消息。

所謂編碼，是依照具有簡單數學式子的一定的原則來組成信号，這種數學式子以後將可見到。

最後，所謂調制，是對於電流——直流電或交流電——的某一

---

\* 有時，例如對傳輸黑白圖象的傳真電報，用不着這種要求。

参数發生作用，而作用的結果，使發送的信号与这参数的变化結合起來了。

可以这样說，編碼決定消息變換為信号的過程的數學一面，而調制則是決定這過程的物理一面。

編碼和調制這兩個問題所涉及的方面是很多的，以下各節將較詳盡地闡述。

### § 5. 离散的消息

首先來看最簡單的消息。這種消息即是文字，或者是密碼形式的數字序列。電報中的消息正是這樣。這種消息之所以稱為离散的消息，是因為這種消息是由各個別單元（字母，數字）組成的。

應該首先明確，离散消息的傳送，總是可以化為不同序列的數字的傳送。事實上，在按字母傳送文字時，並非發出字母本身，而是發出符號，例如字母的順序號碼，或者是通常規定的代表字母的數字。電報電碼，就是這樣編制的。

表面上來看，電報電碼的符號並不需要與數字發生關係。例如莫爾斯電碼，A 相當於符號點一划，並不涉及數字。不過，為了說明編碼結構的原理，為了分析各種可能的編碼方式，數字的概念還是需要的。

### § 6. 計數制度

在進入研究編碼之前，首先應該明確慣用的十進計數制並非計數的唯一制度，必須記住還有很多其他可能的計數制度和表達數字的制度。採用十進計數制的原因，很明顯，是人們的手有十個手指，可以用來計數。這種制度比之其他制度並無太大好處，而且從編碼的觀點來看，其他計數制度反而更為有利。

十進制的特点，是在于它有十个数字（从0至9），在十的限度內任一数值可只需用一个数字寫出。十本身已是兩個数字的数值，这数值可以十位寫1个位寫0的方式寫出。

根据上述十進制計数原則，可以構成由任意个数字組成的計数制度，例如由五个数字（0，1，2，3，4）。这种五進制的特点，在于五本身已經是两个数字的数值，而用五位寫1，个位寫0的方式寫出。下表是五進制与十進制各数值寫法的对照：

十進制 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

五進制 1 2 3 4 10 11 12 13 14 20 21 22

同样，可以用三个数字（0，1，2）構成三進制。在这种制度，三是兩個数字的数值，而用三位寫1，个位寫0的方式寫出。

十進制 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

三進制 1 2 10 11 12 20 21 22 100 101 102 110

从編碼的观点來看，二進制最好。这种計数制用兩個数字（0和1）來寫各数值：

十進制 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

二進制 1 10 11 100 101 110 111 1000 1001 1010 1011 1100

最后，可能有一進制，只利用一个数字計数，例如1。在这种制度中符号的数目就等于数值中1的数目，一進制是最原始的計数制度，將來可看到，它对于編碼是不适合的。

十進制 1 2 3 4 5

一進制 1 11 111 1111 11111

数字的个数，叫做計数制度的基数。上述的計数制都是基数少于十的，对十進制來說，亦就是低的計数制度。同样原理，可以構成高的計数制度，例如十二進制（以打計数），百進制（以百計数）等等。不过，在十二進制的情形，須引用两个新的数字以表示十和十

一(十二已是兩個數字的數值)，而百進制則需要有一百個不同的數字。

將各種制度比較後，可以看出，在計數制中如果基數愈低，亦即運用的數字的個數愈少，則在表示同一數值時該計數制所需要的符號愈多。這些量的相互關係很簡單。任一數值 $N$ 可以寫成：

$$N = b^n,$$

其中 $b$ 是計數制度的基數。指數 $n$ 約成最接近的較大整數後(即把 $n$ 的整數部分加1)，即為寫出數值 $N$ 所需要的符號的數目。

## § 7. 編碼及其單元

編碼的目的是為了傳送數字的。因此，它與計數制度有關。編碼就是將各單元適當聯合而編成單元組。所謂編碼的單元，就是信號的各單元。編碼的單元的作用與數字在計數制度中的作用相同。

關於編碼各種單元之間的區別，應當指出不是任何形式上的區別，而是真實的、顯著的、甚至是極大的區別。這種區別使得收受設備有把握地把編碼的一種單元與其他種單元區別開來。

仍以電報為例，我們來看以單向電流通報的情形。這時，可以利用發送電流(即在一定時間接入電流)和不發送電流，來極明顯地區別編碼的單元。用這兩種單元可以組成二進制編碼。

再看波多編碼。波多編碼有兩種單元，所以是二進制編碼。這種編碼是一種均勻的編碼，就是說，編碼的各組是由同樣數目的單元組成，並且具有相同的持續時間。因此，波多編碼的每一單元占據固定的時間，並在編碼組合內部占據固定的位置。波多編碼的每一組，都是由五個單元組合而成，這種編碼稱為五位編碼。五位的二進制編碼可以發送 $32$ 個不同的字母，因為 $2^5 = 32^*$ 。

\* 在波多電報機中利用譯碼記錄器後，這數字幾乎加倍。