

高壓輸電線上的電話通訊

蘇聯 雅·勒·貝霍夫斯基著

趙 國 南譯

電力工業出版社

目 錄

第一章 電力系統中載波電話通訊的發展簡史	1
第二章 通信技術基本原理	4
訊號的頻帶寬度	1
頻率的變換	6
調制方法	7
調幅(幅度調制)	8
頻率調制(調頻)	10
調制方法的比較	12
話音的聲幅	14
訊號在空間和在導線上的傳播	14
電平測量單位	17
發送電平及接收電平	19
第三章 輸電線上載波通訊的情況	21
頻率範圍	22
高頻範圍中的干擾	23
輸電線的衰減	25
線路配備	26
結合濾波器	28
補償設備	32
高頻扼阻器	33
第四章 正在運用中的主要的各式機件	41
ДПК 機及 МВП 機	41
ЭПО-1 載波機	46
第五章 電力系統中載波通訊的發展遠景	53
附錄 電訊原理的一些名詞	62

第一章 電力系統中載波電話 通訊的發展簡史

輸電線上的載波電話通訊現在是電力系統調度控制的主要工具。由於這類通信非常高度的可靠和經濟，現已獲得廣泛應用。

在高壓線路的導線上有可能傳輸言語是由於許多蘇聯學者、工程師和技術人員的偉大勞動的結果。

在蘇聯，利用輸電線作為通訊用是和建築巨大的地區發電站和遠距離高壓輸電線同時開始的。

在 1922 年，A.A. 糾爾紐歇也夫教授在喀山——莫斯科 110 千伏輸電線上完成了載波電話通訊。以後幾年中，ГФТИ 的專家們，如 A.M. 克魯格略可夫，M.H. 朋金等等在烏拉爾，在頓巴斯，在列寧格勒地區及其他工業中心的許多輸電線上裝置了載波通訊設備（糾爾紐歇也夫載波機）〔Л.1 及 2〕。

自 1929 至 1941 年，在 B.A. 寶雅可夫領導下，在中央有線電通訊試驗所（ЦЛПС）及〔紅霞〕工廠中，這方面的成就更擴大了。B.A. 寶雅可夫會同 H.A. 愛夫杜甘莫夫，H.A. 范斯，O.B. 亦費利莫夫，A.P. 利夫雪奇，Ю.Б. 莫費爾，M.И. 沙夫利摩維奇等其他專家共同合作，辛勤工作，大批出產了 ДПК-20、ДПК-37 及 ДПК-38 各型載波電話機，以及全套線路配備裝置，如結合濾波器、高頻扼阻器、放電器等〔Л.3〕。同時〔Севкабель〕工廠的 Д.В. 剖柯夫及 X.P. 馬爾金和〔絕緣子〕（Изолятор）工廠的 Л.И. 費杜魯夫製造了高壓耦合電容器，以便將載波裝置接上線路，以後主要就應用了〔絕緣子〕工廠的電容器。應該指

出，早先的 ГФТИ 載波機是用所謂「天線」來和線路耦合的。「天線」是長 200—300 公尺的導線，懸掛在高電壓導線的近旁。到現在，相類似的和棧路聯結的方法用在移動載波機，以便和修理突擊隊聯絡之用。

在莫斯科、列寧格勒、頓巴斯、烏拉爾及許多其他電力系統中的通信工作人員對於載波裝置的運用及其精通掌握進行了很大的工作。

蘇聯科學院通訊院士 В.И. 高凡令歌夫、科學技術博士 В.А. 寶雅可夫、科學技術博士 В.И. 伊凡諾夫、工程師 М.Н. 朋金及其他許多學者和工程師的勞動，對於輸電線上的通訊理論有着很大的貢獻。

衛國戰爭以後時期，中央科學研究電工試驗所(ЦНИЭЛ)及電站和電力工業部所屬的許多工廠進行着輸電線上通訊機件的製造和研究。

在蘇聯，除了在電力系統中載波電話通訊方面有着廣闊的建樹以外，同時在輸電線的高頻保護方面，在高頻訊路中傳送遙遠測量訊號、遙遠控制訊號及遙遠號誌訊號方面，也有着廣闊的建樹。

保護用及遙遠機械用的高頻載波機，同載波電話一樣，是工作在 40—300 千赫相同的頻率範圍中。

電話通訊載波機、遙遠機械載波機及保護用載波機，大都是分別接在輸電線的不同相中；可是也有個別情形中，它們是並聯地接在同一相中。

所有這些裝置的工作頻率的選擇，應一起共同進行，以便避免相互影響的可能。電話機件的改良循着兩個方向：Н.А. 烏里楊諾夫斯基建議的頻率調制的應用和沒有載頻的單邊帶傳

輸制的採用。單邊帶傳輸制在長途通訊線路上已廣泛應用，至於在輸電線上應用單邊帶傳輸制來通訊的工作是由中央科學研究電工試驗所及電站部的 Я.Л. 具霍夫斯基和 В.И. 美特維傑夫開始的。在 Н.Г. 苗可金和 Б.С. 克利排諾夫的領導下，會同中央科學研究電工試驗所及 ЛЭТИИС 的工作人員 К.П. 尤古魯夫及 И.К. 鮑露露美斯嘉雅，研究製作了機件的工業產品。新的機件的牌號是 ЭПО-1 (энергосистем пост одно-полосный на один канал 單路單邊帶電力系統載波機)，ЭПО-1 載波機大批生產的生產組織是由 В.М. 亦夫吐新柯領導的。

在 35 及 6 千伏的輸電線上及在邊區或不大的電力系統中的 110 千伏的短線路上，Н.А. 烏里楊諾夫斯基，М.А. 卡爾孟諾維奇及 А.И. 依務歇金又製作了一種簡單的 МВП 型載波機 (Малый высокочастотный пост 小型載波機)，由農業及採辦部的工廠主持，不僅在電力系統中應用着 МВП 載波機，在一些農村的發電站中也應用着 [Л.7]。

聯共十九次代表大會上決議的 1951—1955 年第五個五年計劃中，規定了電力的巨大增長和許多新的發電站、變電站和輸電線的建築。為了使新的電力對象和電力系統的控制中間保證着可靠妥善的通訊，必須更進一步地改良輸電線上的載波通信機件，更進一步地改良大規模生產的生產組織，在最新通訊技術成就的基礎上提高安裝、調整和運載波訊路的品質。

載波訊路對於偉大的共產主義建設——古比雪夫水力發電站和斯大林格勒水力發電站的通訊方面具有着重大作用。必須在 400 千伏的輸電線上完成許許多多可靠妥當和經濟安全的通訊訊路，這在蘇聯電力工作人員和電信工作人員面前

提出了一系列的新的重要的任務，許許多多科學機關、設計部門和工廠正在埋頭鑽研，從事解決。

第二章 通信技術基本原理

輸電線上的載波通信是通信技術許多種類中的一種，用以將言語或訊號傳送到遠距離去。

通信技術的主要任務可以認為是準確地、不失真地和可靠地將訊號傳送到需要的距離外去，這個問題在經濟方面也具有重大的意義——通訊設備的成本，維護的費用，材料及電能的消耗等等。

爲了接收器有可能接收訊號，那末自發送器必須有一部分能量進入接收器中。可是目的在通訊的能量傳輸和目的在電力的能量傳輸是不同的，因爲對於通訊系統說來，發送器——通訊訊路——接收器，在一定限度內，能量傳輸的意義是不大的，次要的。

訊號的頻帶寬度

每個訊號的特徵是它的傳輸和再現所必需的頻帶寬度。訊號要傳送得更準確更快，頻帶也就要求更寬廣。

這在電視和電傳真中圖象的傳送狀態的比較上可以說明。在傳送活動圖像時，鏡頭至少每秒內必須重複 25 次；這便是說，整個圖像所佔傳送時間不得大於 0.04 秒。如果只限於傳送十分粗糙的圖像（人物的輪廓等等），那末比較狹窄的頻帶 5000—10 000 赫（5—10 千赫）就行了。至於品質很高的電視，其中鏡頭分成許多很小的單位，就需要很寬的頻帶（數百

萬赫)。可是在電傳真中，圖像是不活動的，在相同的圖像清晰度時，所需的頻帶就小幾百倍(2—5千赫)，所以傳送的時間就延長達數分鐘。在相同的其他情況下，傳送時間加大多少倍，頻帶的寬度就可減少多少倍。

關於頻帶寬度的問題必須分析最簡單的訊號的傳送。最簡單的訊號——「接—斷」式訊號，是將直流電流或任何固定頻率的電流接通或開斷所產生的。假定說傳送一個最簡單的訊號，例如把領示頻率 1000 赫接上線路，初步看來，通訊訊路的頻帶寬度不論多少狹窄，只要能夠通過這個頻率，就能夠完成傳送，可是實際上並不如此。事實上，訊號電壓成長的時間 t 是和頻帶的寬度 Δf 成反比的。

初步近似式便是：

$$t = \frac{1}{f\Delta} \quad (1)$$

此處 t 單位為秒，又 Δf 單位為赫。

假定，例如線路的開斷訊號應該在不大於工業用電頻率的半個週期內，即 0.01 秒內被傳送出去，那末頻帶寬度 Δf 就

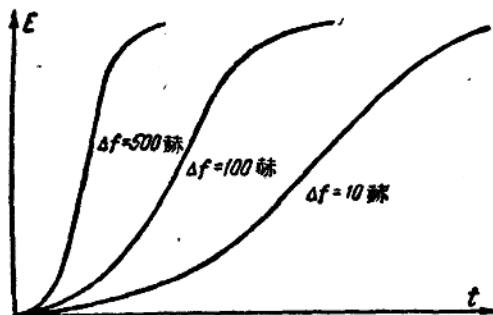


圖1. 不同寬度的頻帶中訊號的成長

不得小於 100 赫。在圖 1 中，表示着各種不同寬度的頻帶的通訊系統中輸出端電壓成長曲線的相對地位。人類話言的真實的再現，所需頻帶自數十赫至 12—15 千赫；可是在電話通訊服務中，傳送自 300 至 2400 赫的頻率就足够了，這便是說，對於正常的瞭解度所需要的頻帶寬度一共是 2100 赫。

頻率的變換

從一個用戶的發話器直接傳送聲音頻率至另一個用戶的受話器是應用在有線電信的話頻訊路中。大多數的長途通訊訊路是工作在高頻率的。要傳送這個或那個訊號，雖然需要一定的頻帶，可是這個頻帶在整個自零以至無窮大的頻譜中所佔的位置可以是各色各樣的。

通信技術的發展，溯自 1895 年 A.C. 波波夫發明無線電以來，以至今日，以頻率的變換和從頻譜的一個區域搬移到另一個區域等改進的方法的實現作為特徵。

電話通話的頻帶 (300—2400 赫) 可以由於載波頻率的調制，譬如說由於 100 千赫的調制，而搬移到 100.3—102.4 千赫區域內，於是便可由無線電或高頻電流導線傳送出去。在接收器方面，由於反調制，將頻帶 100.3—102.4 千赫搬移到訊號的原有頻帶 0.3—2.4 千赫，相似地，言語頻率可以搬移到數百或數千兆赫，於是利用超短波無線電發射台或無線電接續轉播線，以分米波或厘米波 (頻率自 1500 至 30 000 兆赫) 傳送出去。

頻率的變換和用濾波器將它們分離是線路多路利用的原理，線路的多路利用便是在一個線路上可以獲得數十以至數百個互不相關的通訊訊路。用得很多的是三路及十二路通訊

制。這些通訊制中，除了一個話頻的電話訊路外，還可能在線路上傳送頻率 4—40 千赫的三個電話通話和頻率 40—150 千赫的十二個電話通話。這樣，在一個有色金屬線通訊線路上裝載了 16 個電話訊路，每個訊路又可裝載 12—16 個電報訊路（代替了一個電話訊路）。

在同軸電纜上可以獲得更多的（到 500 個）電話訊路，在同軸電纜上傳送着自 60 千赫至 2 兆赫的頻率。

訊號頻帶在調制時，不但可搬移到另外一個頻率區域中去，而且寬度也可變更，通常寬度是增大了。原則上也可應用一種新的通訊方法，可保證使訊號頻帶縮狹，可是這樣需要的設備就十分複雜，所以到今天還沒有獲得廣泛的實際應用。

調制方法

通常應用的頻率變換方法是下列四種中的一種：（1）幅度調制（調幅 AM），其中載頻及兩邊頻帶均被傳送；（2）幅度調制，其中只有一邊頻帶是被傳送的，而載頻及另外一邊頻帶是在變頻器及濾波器中被抑制掉了（單邊帶 ОБП）；（3）頻率調制（調頻 ЧМ）；（4）脈衝調制（ИМ）。

脈衝調制[Л.12]的原理是根據極狹的脈衝的幅度、寬度或相位的變化的基礎上。脈衝重複的頻率應該不小於最高調制頻率的三倍以上。所以 2400 赫以下的通話頻率的傳輸，脈衝重複頻率應為每秒 7000—8000 個脈衝。脈衝調制具有許多優點，但因為傳送很狹的脈衝需要極寬的頻帶，所以脈衝調制主要是用在數百或數千兆赫超高頻的多路無線電通信中。

輸電線上的通信所用的頻率自數十千赫至數百千赫，所以在輸電線上電話訊路中，脈衝調制是不合適的。可是，傳送

低頻的(數十赫)訊號的遙遠測量訊路中,是可以應用脈衝調制的。

調幅(幅度調制)

幅度調制是所有各種調制中最早出現的一種,直到現在,在無線電廣播及老式的或簡單型式的有線通訊機件中被廣泛應用着。它的原理是較高頻率的被調幅波的幅度隨較低頻率的調幅波的變化而相應變化。凡是非直線性電阻都可用作調幅器,如氧化銅整流器或電子管,只要作用在它們特性曲線的非直線性部分。

幅度調制中,以頻率為 F 的正弦波調制了的調制波可以下式表示:

$$u = U_n \cdot (1 + M \cdot \cos \Omega t) \cdot \cos \omega t, \quad (2)$$

此處 U_n ——載波高頻電壓;

ω ——高的角頻率,等於 $2\pi f$;

Ω ——低的角頻率,等於 $2\pi F$;

M ——調制係數;

t ——時間;

u ——調制了的振盪的瞬時值。

等式(2)很容易化為:

$$u = U_n \cdot \cos \omega t + \frac{U_n \cdot M}{2} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{U_n \cdot M}{2} \cos(\omega - \Omega)t. \quad (3)$$

從等式(3)中可見,調幅了的振盪可以看作是三種頻率的總和:幅度為 U_n 的載波頻率 f ,幅度各為 $\frac{U_n \cdot M}{2}$ 的上邊帶 $(f + F)$ 和下邊帶 $(f - F)$ 。

圖2示調幅波的各種圖解。在圖2a中,高頻振盪的幅度包絡線依頻率為 F 的正弦規律而變化着。根據等式(2),因為

最大幅度 $U_{\max} = U_n(1+M)$ ，而最小幅度 $U_{\min} = U_n(1-M)$ ，所以從示波器屏幕上測得了它們的數值，便可按照下式確定調制係數。

$$M = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \quad (4)$$

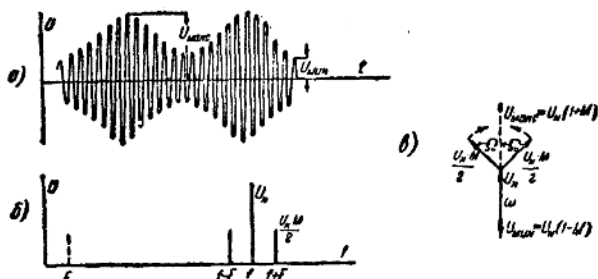


圖2. 調幅振盪

a—電子示波器屏幕上的調幅波的形狀；б—單音調幅時的頻譜；

B—向量圖。

在圖2б中表示了振盪的頻譜的組成，即載頻及位處載頻上下的兩邊帶。

在圖2B中是振盪的向量圖，載頻向量是不動的，是固定在以角頻 ω 而旋轉的平面上。兩邊帶的向量相互以角頻 $+\Omega$ 及 $-\Omega$ 相對旋轉，因此它們的合量的方向沿着載頻向量，由於這三個成分的複合，便得一個不動的矢量，其幅度隨頻率 F 變化，自 $U_n(1-M)$ 至 $U_n(1+M)$ 。

在單邊帶制中，線路上只傳送一個頻率： $(f+F)$ 或 $(f-F)$ ；等式(3)中的其餘的兩個成分，便用種種方法抑制掉了，這在以後要敘述到。當單音調幅時，示波器屏幕上便只見頻率為 $(f+F)$ 或 $(f-F)$ 的等幅正弦波，在頻譜中只剩一線，而在

向量圖中只有一個向量。

頻率調制(調頻)

在頻率調制中, 調制電壓作用於發生器的頻率, 而振盪的幅度保持不變。

在以單音 F 頻率調頻的情況中, 調制波可以下式表示:

$$u = U_n \cdot \cos(\omega_0 t + m \frac{\omega_0}{\Omega} \sin \Omega t). \quad (5)$$

因為頻率是等於相角與時間的乘積, 因此瞬時角頻 ω 依下式確定,

$$\omega = \omega_0(1 + m \cos \Omega t) = \omega_0 + \omega_0 m \cos \Omega t. \quad (6)$$

$\Delta\omega = \omega_0 m$ 值便是和載頻的差週數。 $M = \frac{m\omega_0}{\Omega} = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$ 稱為調制指數, 通常調制指數是以調制頻率 Ω 的最高值表示的。

經過一系列的演化, 與調幅一樣, 等式(5)也可分解為載頻及許多邊帶頻率, 不過這兒所得的表示式比較複雜:

$$\begin{aligned} u = & U_n \cdot J_0(M) \cdot \cos \omega_0 t + U_n \cdot J_1(M) \cdot \cos(\omega_0 + \Omega)t \\ & - U_n \cdot J_1(M) \cdot \cos(\omega_0 - \Omega)t + U_n \cdot J_2(M) \cdot \cos(\omega_0 + 2\Omega)t \\ & + U_n \cdot J_2(M) \cdot \cos(\omega_0 - 2\Omega)t + U_n \cdot J_3(M) \cdot \cos(\omega_0 + 3\Omega)t \\ & - \dots\dots\dots + \dots\dots\dots \end{aligned}$$

上述載頻及無窮多的一系列的邊帶頻率的幅度是以柏塞爾(Бессель)零階、一階、二階、……等函數表示的。載頻的幅度和邊帶頻率幅度的比率隨調制指數 M 之值而變化。

所以, 例如當調制指數是 1, 載頻是未調制載頻的 76.5%, 而第一對邊帶頻率——44%, 第二對邊帶頻率——11.5%, 第三對邊帶頻率——1.9%。如果調制指數 $M=2$, 載頻——22.4%, 第一對邊帶頻率 57.7%, 第二對邊帶頻率——

35.3%；第三對邊帶頻率——12.9%，第四對邊帶頻率——3.4%；其餘很小，可略而不計。

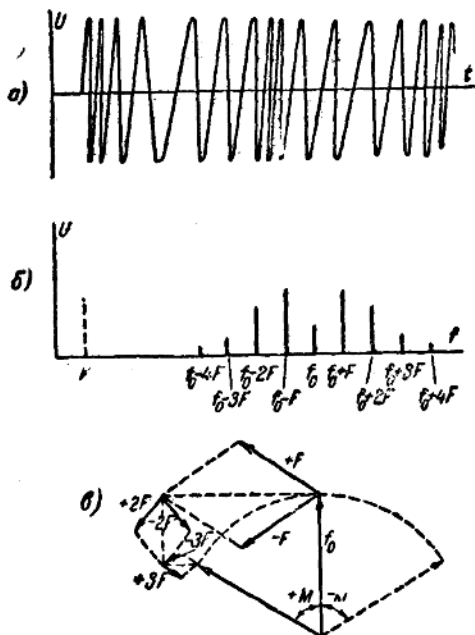


圖3. 調頻振盪

α —振盪電壓是時間的函數； δ —頻譜； θ —向量圖。

在圖3中，表示着調頻振盪的各種圖解。這裏所繪的頻譜是當調制指數 $M=2$ 時的頻譜，在向量圖中，表示着載頻，第一對邊帶頻率、第二對邊帶頻率及第三對邊帶頻率的向量。第一對邊帶頻率的合量的方向是和載頻向量垂直的，第二對邊帶頻率的合量的方向是和載頻向量平行的，第三對邊帶頻率的合量的方向又和載頻向量垂直，依此類推，所有這些矢量的複

合總值便是一個以頻率 F 沿角度為 $\pm M$ 弧度的圓周上往復來回的向量。

調制方法的比較

在自 F_1 至 F_2 的頻帶調制的情形中，訊號的頻譜不是單一條線，而是位在載頻兩旁的頻帶（圖 4）。在幅度調制中，頻帶自頻率 $(f - F_2)$ 至頻率 $(f + F_2)$ ，寬度為 $2F_2$ ；在單邊帶傳輸中，頻帶自 $(f + F_1)$ 至 $(f + F_2)$ ，寬度為 $F_2 - F_1$ ；在頻率調制中，頻帶自 $f - nF_2$ 至 $f + nF_2$ ，寬度為 $2nF_2$ ，此處 n 是最高調制頻率 F_2 的調制指數 M 的倍數。

頻率調制是用來減低對於接收裝置的干擾影響的。通常在無線電發射器中所應用的調制指數約是 5，這在寬帶廣播中就得有寬度約 100—150 千赫的頻帶，在電話通訊中就得有寬度約 30—40 千赫的頻帶。

由此可見，頻率調制主要是用在短波及超短波範圍中的，以便配置很多的無線電台，使頻率不夠的問題不會嚴重。至於在輸電線上的通訊，整個頻率範圍只用 250 千赫，這樣寬度的頻帶的訊路是不適用的。H.A. 烏里楊諾夫斯基的研究指出，在輸電線的高頻通訊裝置中採用不大的調制指數 $M=1$ ，頻率調制比幅度調制在干擾穩定度方面要優越約 1—1.2 奈。當 $M=1$ ，係數 n 應該約為 1.25，即在輸電線上的頻調訊路所用的頻帶等於 $2.5F_2$ 。

按照電話訊路中， $F_1=300$ 赫又 $F_2=2400$ 赫，所以在幅度調制中頻帶為 4800 赫，而在頻率調制中為 6000 赫，又在單邊帶制中為 2100 赫。

因此，在頻譜的應用方面說來，單邊帶制是最經濟的；當

幅度調制時，訊路寬度大至 2.28 倍，而當頻率調制時要大至 2.86 倍。

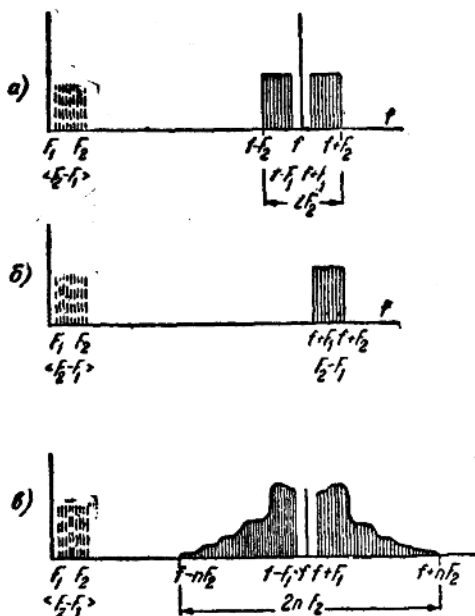


圖4. 在各類調制中的電話訊路的頻譜
a—幅度調制，載頻及兩邊帶均傳送；b—單邊帶傳送制；
c—頻率調制。

在干擾穩定度方面，單邊帶傳送制與頻率調制，比了幅度調制，有着大致相同的優點，因為發送器的全部功率是用在有用訊號上，此外，接收器的頻帶愈狹窄，遭到的干擾也愈小。

所以，單邊帶傳送制，在很大的程度上滿足了輸電線上通訊的條件，因此在大部分現代機件中被廣泛地採用。

適當地應用頻率調制，可獲得很大的干擾穩定度，而需要

的工具也比較簡單，可是在頻率節約問題上却沒有重大意義。

幅度調制保持着它的作用，因為按照幅度調制原理裝置的機件最為簡單經濟，因此可以用在不需很高的干擾穩定度和很多的通訊訊路情況下，也就是用在不大的電力系統或6—35 千伏的電力網中。

話音的聲幅

說話的聲音除了以頻譜來特徵外，也可以在極大限度內變化的音響度來特徵。發話器對於個別的聲音所引起的壓力可能比通話時壓力的平均值高出7—10 倍。言語強度變化的再現愈是完善，或通訊系統的聲幅愈是寬闊，言語的再現也愈逼真。可是，在強大干擾的情況中，適當地縮狹聲幅和削切壓力的峯值，以便把訊號的平均電平提升到干擾電平以上。

因此在發送器的低頻率路程中受到了限制。

也有應用很複雜的裝置，稱做壓縮—擴大器的。這種裝置在發送器中壓縮了言語的聲幅，而在接收器中再把它擴大，這樣一來，干擾壓力的作用不致於降低聲音的逼真度，此外在停息時間極強有力地削弱了干擾。

訊號在空間和在導線上的傳播

通訊頻率範圍的選擇是由它們在空間或沿某種型式的導線上傳播的特性、通訊訊路的長度、在頻譜各段中的干擾電壓值、設備的經濟性等等以及其他原因所決定的，在無線電通訊中，發送器的能量消耗在空間。即使甚至在應用了定向天線或反射子的情形中，輻射或多或少地集中一束，接收器也只能獲得發送器所送出的能量的極小部分。單位面積所通過的功率

是和距發送器的距離平方成反比的，由此可見，在一定長度的接收天線中所引起的電壓是和距離的一次方成反比的：

$$U = \frac{U_1}{l} \quad (8)$$

在等式(8)中， U 代表距離發送器 l 公厘的天線中所引起的電壓； U_1 代表距離發送器 1 公里的天線中所引起的電壓（無線電波在大地表面上傳播時，在大地中產生損耗，可是爲了簡化分析起見，可不予考慮）。

能量沿導線上的傳播根本是另外一種樣子，這時候能量在空間差不多沒有消耗，可是在導線中，在導線之間的絕緣物中及在大地中却有着實耗損。

在不長的距離的導線上傳輸，功率的削弱不顯着，在這種情況中，這些損耗是不大的。可是當長距離的有線傳輸時，訊號的削弱會十分迅速，遠較無線電通訊中嚴重。

訊號的電壓和功率對於距離的關係，如下式所示：

$$\begin{aligned} U &= U_0 \cdot e^{-\beta l} \\ P &= P_0 \cdot e^{-2\beta l} \end{aligned} \quad (9)$$

此處 U ——距離線路起端 l 遠的線間電壓；

U_0 ——線路起端電壓；

β ——衰減係數；

P ——距離 l 遠的訊號功率；

P_0 ——線路起端功率；

e ——自然對數的根($e=2.71828$)。

衰減係數 β 表示了單位長度相應的功率損耗：

$$\beta = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (10)$$