

长途电缆 高频通信系统的 设计特点

苏联 B. H. 耶戈罗夫 著
邮电学院长途电信教研组译

人 民 邮 电 出 版 社

长连屯项 高频通信系统的 设计特点

王 强

（北京邮电大学）

摘要：本文介绍了长连屯项高频通信系统的设计特点。

关键词：长连屯项；高频通信系统；设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

长连屯项高频通信系统的设计特点

長途電纜高頻通信系統的 設計特點

蘇聯 K.П. 耶戈羅夫 著

郵電學院長途電信教研組譯

人民郵電出版社

К. П. ЕГОРОВ

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СИСТЕМ ДАЛЬНОЙ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВЯЗИ
ПО КАБЕЛЯМ

СВЯЗЬИЗДАТ

МОСКВА 1949

內 容 提 要

本書對各項干擾、噪音、失真、干擾電平的計算方法，電纜干線高頻通信設備的設計要領，以及深水同軸電纜通信的特點等，都作了扼要的論述。

這本書是收集近代各種期刊上有關電纜高頻通信系統的設計論文，加以綜合而編成的，是目前電纜干線設計方面比較有系統的參考資料。

長途電纜高頻通信系統的設計特點

著 者:	蘇 聯 К. П. 耶 戈 羅 夫
譯 者:	郵電學院長途電信教研組 李樂民 張樹京 唐人亨 胡健棟 黃庚年 李國瑞 錢錫鈞
出版者:	人 民 郵 電 出 版 社 北京東四區六條胡同十三號
印刷者:	北京市合作總社印刷廠
發行者:	新 華 書 店

書號有84 1956年10月 北京第一版第一次印刷1—2,800冊

787×1092 1/32 58頁 印張3 $\frac{20}{32}$ 字數60,000字定價(10) 0.55元

★北京市書刊出版業營業許可証出字第〇四八號★

序 言

战后斯大林五年計劃中規定了在長途電纜上要大量地發展高頻通信工具，因而就需要出版一些有關闡述這種技術理論和實際問題的書籍。

关于現代電纜高頻通信制的主要計算原理，在專門的書刊中尚未有过系統的闡述。本書的目的是为了適当地來弥补此項缺陷，因而收集了一些刊載于各种期刊和書籍中的具有較大價值的資料，并將这些資料綜合在一起。

書中所敘述的資料不能作为設計機構的指示，因为這些資料僅是指出某些有关電纜干綫設計的可能的計算方法。

綫路問題与机械的結構問題是彼此密切相关的，因此不能將此二者彼此孤立地來研究。書中論述了由于研究綫路設備和机件的相互影响而得出的、藉以確定電纜上現代長途高頻通信制結構的基本情况。

本書主要是为研究長途通信設備的設計和計算問題的工程师而寫的，但对通信工程学院的高級班学生也是有用的。

有关本書的一切意見，請寄交邮电出版社（Москва, Центр, УЛ. Кирова, 40）

著 者

目 錄

序 言

1. 電纜高頻通信	I
2. 熱雜音和散射效應	17
3. 非直線性失真，增音站放大器過負荷極限的確定	26
4. 非直線性失真產物的計算	43
5. 電纜干線上的發送電平	56
6. 寬頻帶雜音影響的計算	65
7. 非直線性失真影響的計算	75
8. 電纜通信中的頻率失真	85
9. 設計機械時的基本觀念	96
10. 深水同軸電纜通訊特點	108

第一章 電纜高頻通信

具有大量電話通路制度的現代高頻通信，在實際上可以保證通信信號長途傳輸的一切需要。電話通路可適合於傳輸電報、傳真電報、以及廣播的電流。僅在傳輸電視信號時必須使用專門的同軸電纜，但此種電纜也可有成效地用來通電話。

當分析電纜長途通信的問題時，由於電話通路具有代表性，所以只限於分析長途通話系統就夠了。

在很多技術方面具有優先地位的俄國發明家們，也曾從事於電纜通信技術的研究。最早的地下電纜的發明與源出於俄國的電報發明是密切相關的。電報的發明人П.Л.許林格架設最早的通信綫路時所用的就是地下電纜。這些電纜雖則極其簡單，但卻具備現代電纜的一切構成部份。1841—1843年間，B.C.雅科比院士建成了彼得堡與察爾村（今之普希金城）間的長途電信電纜綫路。製造此類綫路（封閉於玻管中之導體）的技術程序，質量和材料選擇，以及尋找和消除障礙的方法，由於缺乏經驗的緣故，當時還有缺點。但是雖然如此，這種綫路一直存在了幾年，後來限於當時技術上的可能性，不得不暫且捨棄架設通信電纜綫路，而代以長途報話通信技術中久居首要地位的架空明綫。當時主要只使用水底電纜用作電報通信。為了減低架空話綫上之公里衰耗，在這些綫路上進行了加感的工作。架空明綫上加感存在着許多缺點，這些缺點就是：加感電路的衰耗非常急劇地隨大氣條件而改變，感應綫圈常因天氣作用而損壞。為了

順利實現加感的好處，就需要有受天氣影響小的線路，此種線路就是電纜，它們有着比架空明線較高的可靠性。在長途線路上直接使用敷設於市話網的空氣紙條絕緣電纜時，由於這等電纜對的工作電容不穩性，不能獲得完滿的效果。必需要有更堅固穩定的構造形式，於是創造了紙繩絕緣電纜。此種電纜之加感不同於架空明線，它所產生的是優良的效果。第一次世界大戰以前的年代中，加感電纜技術發展的特徵，是力求使長途電纜上不用增音機的電話通信距離能達到與在架空明線上一樣，即通信距離約為 600 公里。長途電話發展的這一階段，在電纜構造上的特徵，除了利用加感外，還應用了直徑達 3 公厘的電纜心線，這種電纜的價值高，製造又困難，因此這種電纜未得到推廣。第一次世界大戰時電子管放大器的發明，改變了原來的情况，電子管增音機與加感紙繩電纜相配合，就成為第一次大戰後在領土不大的國家內建立長途電話通信網的基礎。由於應用增音機，減小電纜心線的直徑便獲得了成功。國際電話諮詢委員會（МККФ）建議禁止架空明線加感，並規定了電纜加感的標準方式。該委員會的工作蘇聯也參加了。表 1 中所載為加感電纜的主要數據，此種數據即作為大多數音頻通話電纜網的特徵。

採用二線制時（圖 1），由於中間增音站混合線圈的平衡困難，因而通話干線的增音段不能超過 6 — 8 個，所以對長距離通信要採用四線線路。在四線線路上，每一方向採用單獨的二線電路。二線線路經常採用 1.3—1.4 公厘線徑的導線，四線線路則用 0.9 公厘的。同時，在中級加感方式的二線制和四線制線路上增音機的配置都是隔 140 公里。沒有混合線圈的四線增音機的很大增益，補償了因減小四線電路心線直徑而增加的衰耗。在數千公里長的距離上採

加感等級	心綫直徑 (公厘)	加感節距 (公里)	綫圈電感 (毫亨)	$f=800$ 赫時之 衰耗 $\frac{\text{實綫}}{\text{幻綫}}$ (奈培/公里)	臨界頻率 (赫)	增音段 長 度 (公里)	双向 通信 制为:
中級	0.9	1.83	177/63	0.0217/0.0228	2900/3600	160	四綫制
中級	1.3	1.83	177/63	0.0121/0.0125	2900/3600	160	二綫制
輕級	0.9	1.83	44/25	0.0390/0.0328	8800/6600	80	四綫制
中級	0.9	1.7	140/56	0.0185/0.0185	3450/4300	140	四綫制
中級	1.4	1.7	140/56	0.0095/0.0095	3400/4300	140	二綫制
輕級	0.9	1.7	30/12	0.035/0.025	7700/9300	70	四綫制

用了所謂輕加感方式的綫路(表1)。在輕加感方式的綫路中,靠增大臨界頻率減少了許多有害現象的作用,這些有害現象與加感對電磁波能量傳輸的速度所起的影响有關。但是,這些改進是由于增大電纜之公里衰耗獲得的,因此各增音段的長度減小了二分之一。圖3所示為電纜綫路之特性曲綫。

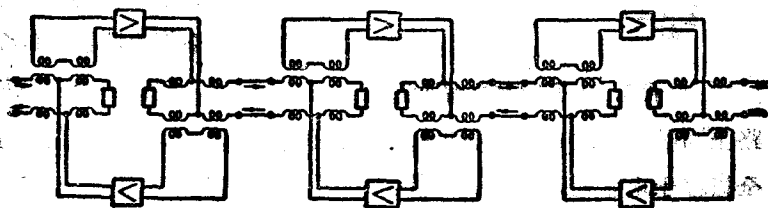


圖1. 二綫通信系統

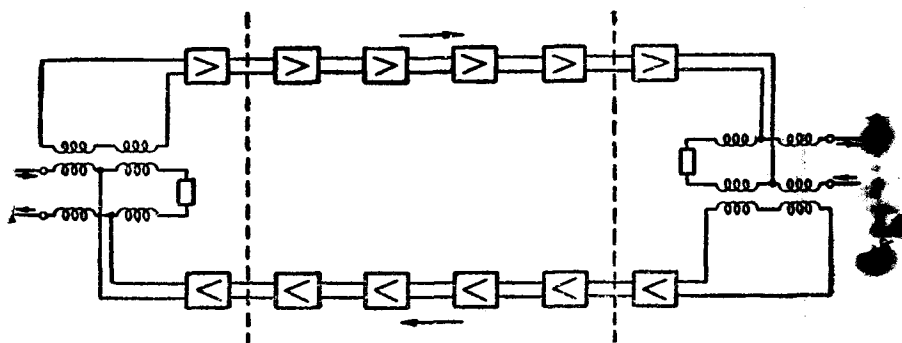


圖2. 四綫通信系統

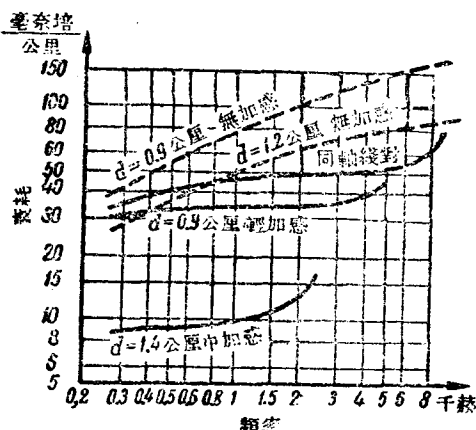


圖3. 電纜綫路之特性曲綫

長途電話的發展也影响了电报通信的方法。除了在電纜綫路上獲得某些推廣的亞音頻電報以外，同時應特別提到在這些綫路上最初出現的四綫制音頻多路電報。在利用電話電路全部中間設備的情況下，在每一電話單向通

路上同時進行到18路電報傳輸的可能性，乃是將干綫通報量幾乎完全轉移於電話通路的先決條件。

利用長途綫路來傳輸廣播電流的需要，也提出了怎樣將電話電纜心綫用作這種用途的問題。但是，直接將電話通路用作這種電路是不可能的，因為這些通路通過的頻帶太窄（300至2700赫），而對通

話所允許的串話電流影響程度作為廣播的目的來說又太大。在電纜構造中曾規定了帶有特別輕加感的獨立屏蔽綫對作為傳輸廣播電流。這些綫對在頻帶為50至6400赫的傳輸中可以沒有嚴重的失真，後來頻帶的上限又提高至8000赫。

電纜電路的音頻通路，對於傳輸傳真電報的電流也是適宜的。因此，當建成最初的電纜網時，雖然當時還只在音頻內使用，就已經奠定了這種表徵現代長途通信制特點的電話通路通用性的基礎。

如前所述，加感電纜音頻通話網在領土比較不大的國家內獲得了發展。在干綫經常長達數千公里的這些國家，除使用電纜外，也繼續使用着架空明綫。

在第一次世界大戰以後的時期內，長途通信的發展在電纜方面如果可以用加感來表征，那末在同一時期內，在架空明綫方面則可採用低頻增音以及逐漸採用高頻通話機械來表徵。

使用放大音頻電流的電子管增音機，未能解決在長達數千公里的架空明綫上的通信問題，這是因為在這樣的長距離上使用二綫制是不可能的，若改為四綫制的話，則對於架空綫路來說，無論是從經濟方面或技術方面上看來都不合算。大家知道，在二綫架空綫上構成通信的唯一方法，只有採用電氣四綫高頻通話法，這種通信的穩定度是與電纜四綫通信的穩定度相同，而其距離甚至超過電纜四綫通信的。

高頻通話制除了保證有較長的通信距離外，同時也具有極其重要的優點，即可顯著減少每公里電話通信的用銅量。

如果在綫徑為3公厘的架空綫上不用高頻通話制，那末，這種

纜路每公里電話通信的銅消耗几乎等于容許傳輸一路音頻通話的加感電纜的二倍多，這種情形驟然看來，可成為架空纜路作為通信工具的無利可取的標誌，但是，如果將架空纜即使是用作三路通話，那末這種對比關係就顯著地變得對採用架空纜有利。尤其是如果考慮到電纜的製造除了需要銅以外，還需要許多附帶的貴重材料，例如鉛，則更說明了作為長途通信工具的架空纜之所以得到廣泛採用的原因。

由上述見解得出，為了減低絕對價值極大的電纜通信費用，不可避免地會產生利用每對電纜心纜來通數路高頻電話之理想。實現這理想的主要障礙，就是使有效傳輸頻帶受到限制的加感。

想到取消電纜加感的另一原因，是由于在加感電纜纜路上傳播速度小，使通信距離有限制。在中級加感電纜纜路上，電磁能傳播速度約為15000公里/秒，這種不大的傳播速度即是由于加感的關係所造成的。當考慮到國際電話諮詢委員會制定的標準，規定在長途干纜上電磁能傳播時間的最大值為100毫秒時，我們得出在中級加感電纜上四纜通信的最大距離只總共為1500公里。

為了增加通話距離，規定了所謂“輕級加感”方式（表1）。

在若干已發展了加感電纜網的國家中，用逐步減輕加感及在擴大頻率範圍內同時組織高頻通路的方法來消除加感的有害影響。

向這方面發展的第一步即是採用附加一路高頻電話的方法。這種方法就是在輕加感星絞纜組上、頻帶為0.3—2.7千赫的音頻通路上，再附加一路頻帶為3.3至5.7千赫的高頻電話通信。此種通信制曾獲得推廣，因為它能在原有的電纜纜路上應用，並且使通話數量增加一倍。

第二種更根本的方法就是完全不採用電纜加感，這時電磁能傳播速度增至200,000公里/秒，因此當傳播時間標準為100毫秒時，這就保證通信距離可達20,000公里。無加感電纜纜對是沒有臨界頻率的，因而可作多路高頻傳輸。在已知長度的線路上傳輸頻率的上限取決於增音機，可能增益的大小和保持在同一鉛皮內的電纜纜對防衛度標準的可能性。現代放大的技術以及製造紙繩電纜和在建築于纜時將此等電纜進行平衡的技術，允許了使用頻帶達60千赫，後來擴大到108，甚而達到204千赫。

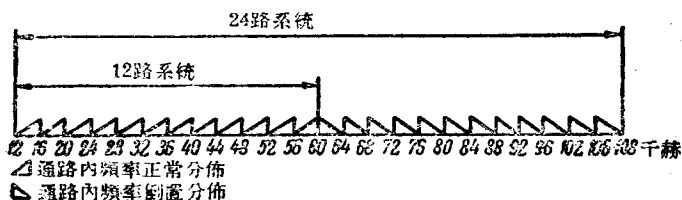


圖4. 12路和24路系統的頻譜

在高頻通信時由於無加感電纜的顯著衰耗，就必須極稠密地裝置增音機。在使用頻率達60千赫時，必須每隔30—40公里裝置一個增音機。增音機數量多時，就需有可靠而穩定的放大器以及採用特殊的供电管理方法。這些問題已經獲得解決。因而在實際上也解決了關於不採用極輕微加感電纜的問題，雖然這種加感電纜有一主要優點，即由於加感作用可以增大增音段距離。傳輸寬頻帶的加感電纜僅對某些特殊目的才屬有用。

圖4所示為在紙繩電纜上的12路及24路高頻通話制所用的頻譜。

這種頻譜之上限係由上述見解而確定的，下限則由製造足夠簡單的放大器的可能性和修正網絡的構造來確定的。當選擇的數值為

12千赫时，放大器应通过頻帶的相对寬度甚至在24路通信系統的情況下也不致使放大器过分複雜。此外，圖5所示为紙繩電纜公里衰耗与頻率的关系。由此圖可見，当頻率低于12千赫时，这种关系的曲線即彎曲而不是直線性，因此就使其修正困难。在复用綫对上实现音頻通話是不適合的，因为需要另行構成一个用濾波器使其与高频通路分开的特殊通路，若注意到只不过是增加一个話路时，那末这样做就未必有意义。因之12千赫以下的頻率範圍內在实际上仍然是未能使用的。

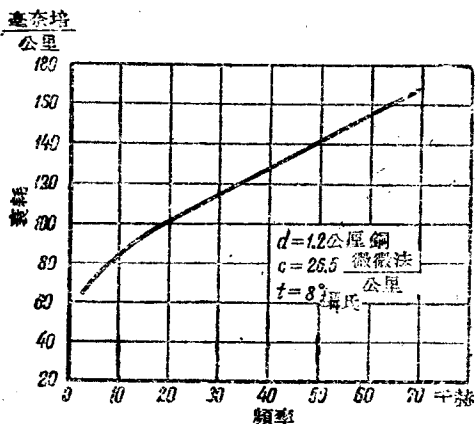


圖5. 紙繩電纜衰耗之頻率特性曲線

建立12路通信系統时，要求在綫路上能傳輸載頻为12、16、20……56千赫的上边帶。

將電纜綫对复用到24路时，除上述佔用頻譜为12至60千赫的12路組外，并傳送直接与其相鄰的，佔用頻譜为60至108千赫的第二个

12路組。这个12路組在綫路上所傳輸的是載波頻率为64、68……108千赫的低边帶。組成24路通信制的兩組構造的不一致性將在下面說明。

48路通信制之頻譜尚未規定，但可設想，即組成这种通信时，是將在24路通信制的兩組（12路）上面再加上兩組。此兩組也由每組12路構成，兩組总共佔用頻譜为108至204千赫。僅附加一个12路

組時，可得36路通信制。

目前最普通的通信制為12路，亦即使用頻譜為12至60千赫。

圖4所示之頻譜在傳輸之兩個方向均使用。為此目的採用實際上的四綫制，即類似圖2所示者，此種四綫制，與圖2所示之四綫音頻通信的區別僅是具有高頻終端設備。用於此種通信制的增音站甚簡單，僅由放大器本身和與這些放大器相連之修正設備所構成。使用在架空明綫上所採用的，在電氣上為四綫、而實際上為二綫的通信制，會使得必須用濾波器來劃分傳輸方向。由於增音機的數目多，所採用的濾波器也會增加此種通信制的費用，並會造成顯著的頻率失真和相位失真。

真正的四綫制雖具有許多優點，但同時又具有一項本質上的缺點，這一缺點可藉圖6來說明。圖中所示為兩終端站間的一段四綫回路。

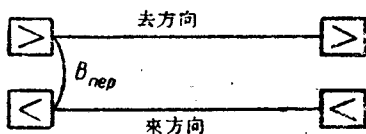


圖6. 串話電流路由

綫路接收端之防衛度等於串話衰耗值 B_{nep} 減去了 P_1 和 P_2 兩電平的差值。按現行標準（即防衛度不應低於8奈培，接收電平與發送電平可相差7奈培）計算，則得下式

$$8 = B_{nep} - (P_1 - P_2) = B_{nep} - 7$$

故 $B_{nep} = 15$ 奈培

在一電纜內不採用特殊複雜的屏蔽而獲得如此大之串話衰耗值

是不可能的。但是，為了利用四綫制之主要優點（構成設備基本部分之中間增音站甚簡單），在多數情況下對相反的傳輸方向採用敷設於同一地溝中的兩根單獨的電纜。

這時，由於導綫的分開，特別是由於電纜鉛皮的電磁屏蔽，都能達到較大的串話衰耗值。由於電磁屏蔽的結果，電纜綫對上傳輸的電流頻率越高，則串話衰耗也越大。

現今之高頻紙繩絕緣電纜的四綫組與舊式結構的四綫組有些不同。為了減少綫對的公里衰耗，綫組的工作電容做成26.5毫微法/公里（以代替舊式結構的36—40毫微法/公里），為此用星形扭絞來代替從前通用的復對扭絞。這些四綫电路的心綫直徑在許多場合是由0.9公厘增至1.2公厘。綫對間的耦合系數大大地降低。圖5所示的公里衰耗頻率特性曲綫與此種電纜相適合，它是在電纜內部溫度攝氏8°時測量的。近來為了繼續減少紙繩絕緣電纜的公里衰耗，除使用紙絕緣外，已經開始採用聚苯乙炔絕緣——一種介質耗損極小的絕緣材料。

將無加感電纜的每一綫對都复用，則可使電纜中的四綫組數大大減少。現今可看到四綫組數不到十組的高頻電纜，通常綫組數目是不超過二十的。

改善高頻通路之質量和改進其二次复用的方法，可以使用這些通路在干綫上不僅能通電話，而且也能通電報和傳真電報。

為了能夠傳送廣播電流，進而在現今的紙繩絕緣電纜中使用屏蔽加感綫對。但是，目前的趨向則希望廣播電流也在高頻复用頻譜內傳送，以便利用高頻設備的全部中間裝置和部分的終端裝置。將若干電話通路合併成較寬的廣播电路時，此點即可達成。

這樣一來，現代的高頻電纜干線的利用幾乎充分說明了電話通路通用性的意義。

無加感紙繩電纜上复用制的發展未能完全取消臨界頻率不大的舊式加感方式。12路及24路通信制作為大城市間之通信是方便的，但是這種方式不能保證干線上的次等城市間之通信，對組織業務通信亦屬不便。為了達到這一目的，在高頻電纜中的一部份四線組可以加感，並用來以音頻四線和二線通路之形式來組織這種通信。也可以在相當的範圍內（不長的段上）將這些通路用作為在發生故障時的各用高頻通路，這就需要使音頻通路的有效傳輸頻帶和現代的高頻通路的頻帶相等。大家知道，這種頻帶的範圍為300至3400赫。

上述最廣泛使用的星絞紙繩電纜，其心線直徑為1.2公厘，纜對電容為26.5毫微法/公里，在其實線電路中就能保證這種頻帶。在幻象電路中的傳輸上限約為2700赫左右。這種情況並不重要，因為如果在这种電纜中採用幻象電路的話，也僅供業務通信之用。

前面已經說過，除不加感電纜外，用來傳輸高頻的加感電纜也獲得了適當的運用。這種電纜目前已為人們所知曉，當加感時可以傳送頻率達60千赫的電流。由於這些電纜臨界頻率的數值高，所以使得加感節距從原採用的約為1.7公里減低到250—500公尺。因此，此類電纜就叫作密加感電纜。

這些電纜之主要優點即在於公里衰耗小。因此在聚苯乙炔塑料扭繩絕緣之密加感電纜上配置12路增音機時，其距離較在無加感電纜上約可增長二倍。這一優點就確定了這些電纜的應用地區——在增音站裝置和維護困難的地區，如山地和荒漠等處，敷設這種電纜是很方便的。密加感電纜之缺點為由加感所引起的線路設備價