

无线电通信技术丛书

单边带无线电通信

A. Γ. 阿尼西莫夫 著



无线电通信技术编辑部

前 言

使用单边带通信与其它无线电通信方法相比较其特点是能较好地利用频带与发射功率以及减少各种干扰与衰减作用。因此其使用范围逐渐扩大，单边带无线电台的数量将日益增多。

书中研究了以下单边带通信问题：单边带通信原理、线路中某些元件的工作、单边带信号之形成与接收方法、无线电线路中的信号失真、接收的抗干扰性以及某些单边带设备。

本书利用简单方块图、各种图解（频率、时间、矢量曲线图）及最简单的三角函数换算来加以阐明。

由于考虑到使用单边带通信的意义日益增大以及广大读者对它的极大兴趣，作者竭力通俗地叙述了某些有关问题。

在世界科技参考文献中有很多著作阐述单边带通信的某些问题，但至今尚无一本书通俗地、系统地综述某些主要问题。作者对解决这一期待已久的课题作了初次尝试，并在此对能通过出版社向作者提出意见的读者预先致谢。

作 者

目 录

前 言

第一章 一般問題	(1)
1. 单边带无线电通信原理、基本概念	(1)
2. 某些线路的工作原理	(11)
第二章 单边带信号形成法	(23)
1. 滤波法	(23)
2. 移相法	(27)
3. 綜合法	(31)
第三章 单边带信号的接收方法	(40)
1. 最简单的方法	(40)
2. 移相法	(41)
3. 綜合法	(48)
4. 有导频信号和无导频信号工作时的接收	(51)
第四章 单边带信号的失真	(58)
1. 传输时的失真及其免除法	(58)
2. 接收时的失真及其免除法	(79)
第五章 单边带信号接收的抗干扰性	(89)
1. 正弦干扰时接收的抗干扰性	(89)
2. 杂音干扰及脉冲干扰时接收的抗干扰性	(95)
第六章 几个单边带无线电通信设备	(101)
1. 单边带无线电干线通信设备 (OPM)	(101)
2. 双路电话系统	(102)
3. 控制导频信号的单边带系统	(105)
4. 弗林納克 (Френак) 系统	(108)
附表: 本书插图中俄文缩写字一览表	(114)

第一章 一般問題

1. 单边带无线电通信原理、基本概念

俄国学者 *M. B. 舒列依金* 在 1916 年《地雷工程通报》杂志上发表的《高频振荡器用于无线电电话学的条件》的论文中第一次指出，一个经低频振荡 F 调幅的高频振荡 f_H 可用三个简谐振盪（频率分别为 $f_H - F$ 、 f_H 和 $f_H + F$ ）的和来表示。实际上，我們假定已調振盪为

$$u = U \cos 2\pi f_H t \quad (1)$$

其振幅按如下规律变化（調制）：

$$U = U_m(1 + m \cos 2\pi Ft), \quad (2)$$

式中： m —振幅調制系数，表明振幅变化最大相对深度；

U_m —未調制（即 $m=0$ ）时高频振盪的振幅；

t —時間。

則
$$u = U_m(1 + m \cos 2\pi Ft) \cos 2\pi f_H t. \quad (3)$$

利用已知的三角公式：

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} \cos (a-b) + \frac{1}{2} \cos (a+b),$$

展开括号便得：

$$u = \frac{m}{2} U_m \cos 2\pi (f_H - F)t + U_m \cos 2\pi f_H t + \frac{m}{2} U_m \cos 2\pi (f_H + F)t. \quad (4)$$

根据上式，調幅波的頻率分布图（頻譜）如图 1 所示。当 $m=0$ ，即无調制时，只有頻率 f_H 、振幅 U_m 不变的高頻振盪存在。頻率 f_H 称为載頻，这样命名的意思是由于借助高頻振盪能順利地进行相当远距离的无綫电通信。因此，採用調制法，看起来好象是把应当发送的低頻信号的「印跡」刻划到高頻振盪上。可见，对有用的低頻信号來說，高頻振盪起着載波的作用，或者說，是起着「运送者」的作用。目前，載頻振盪常簡称为載波。

在以調制系数 m 和頻率 F 进行調制时，除載頻振盪外，还出現所謂边頻振盪。每个边頻的振幅都与載頻的振幅以及調制系数成比例，两个边頻振盪的振幅相等，而頻率各与載波頻率相差同一頻率 F 。

調幅波向量图示于图 2。載波电压向量可以表示成如图 2 所示的静止状态，因为，我們假想观察者是和这个向量在同一方向上以同样的角速度 $2\pi f_H = \omega_H$ 轉动。于是，下边頻的（按頻率向量）以角速度 $2\pi F = \Omega$ 对載波电压向量向負方向（順时針方向）旋轉，而上边頻的向量以同样的角速度向正方向（逆时針方向）旋轉。合成向量的相位在平面图上的位置与載波的相位相同，而合成向量振幅是按公式 (2) 随时間变化的。

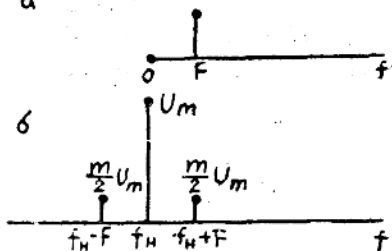


图 1 振盪頻譜图

a) 調制頻率的頻譜

b) 調幅波的頻譜

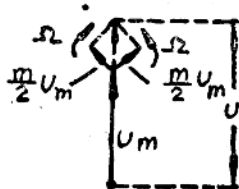


图 2 調幅波向量图

我們已經談過了用具有頻率 F 的簡諧低頻信號調制的頻譜圖。如果調制信號包含許多頻率（如 F_1 、 F_2 和 F_3 ）或佔有整個頻帶（ $F_{\text{мин}} \sim F_{\text{макс}}$ ），比較複雜時，也有類似的頻譜圖，如圖 3 所示。

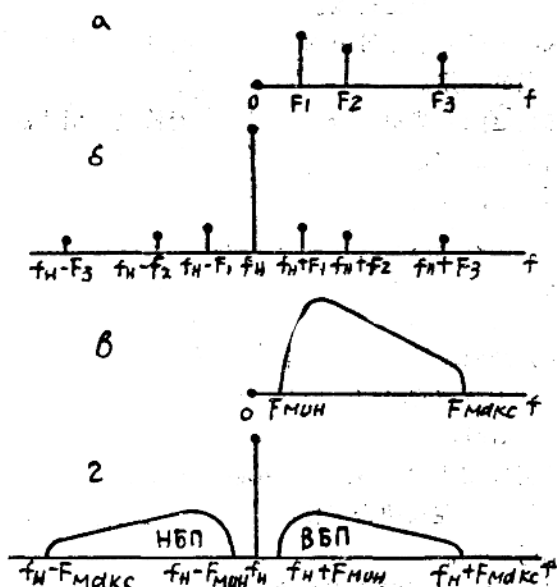


圖 3 調制信號（а 與 б）及相應的調幅信號（б 與 2）頻譜圖

在調制信號比較複雜時，在調幅信號頻譜中，除載波外，還有兩個邊帶：下邊帶（НБП）和上邊帶（ВБП）。

對上述調幅波信號頻譜的研究表明：傳遞低頻信號的有用信息，只包含在兩個邊帶中的任一個邊帶內。載波本身並不含有任何信息。

由此可见，使用包含两个边带的普通的調幅信号頻譜，显然是不合理的。

首先，把发射机的大部分功率消耗在发射机載波上是没有意义的，因为，为了解調所需的載波电压，很容易从接收机內的小功率本机振盪器上得到。

其次，限制两个边带中的一个边带的发射，可以节省无綫电通信頻段的使用。

考虑到这两种情况，就出现了許多无綫电通信方法。这些无綫电通信方法都是利用某一种变形調幅信号（图 4）。

这些变形調幅信号有下列几种〔2〕：

- （1）減弱載波的双边带信号（图 4,б）；
- （2）无載波的双边带信号（图 4,а）；
- （3）有載波的单边带信号（图 4,з）；
- （4）減弱載波的单边带信号（图 4,д）；
- （5）无載波的单边带信号，或簡称单边带信号（图 4,е）。

載波得以相当的衰減或全部抑制，能更合理地利用发射机的功率；但是，在双边带工作时，信号頻譜的宽度仍然是和普通調幅信号相同。

同样，抑制調幅信号两个边带中的一个边带，几乎能使信号所佔的頻带宽度減小二分之一；但是，实际上不能得到什么功率上的增益。此外，把这种工作形式（图 4,з）用于无綫电广播的可能性的研究指出，为了免除显著的失真，必須將調制度限制在 $m = 0.2 - 0.3$ 范围內。

单边带无綫电通信最为合理。此时，在載波得以相当衰減或完全抑制的情况下，只发送調幅信号两个边带中的一个边带。对单边带信号相当于零調制頻率的这个載頻，通常就是发

射机和接收机調諧好的正常通訊頻率。

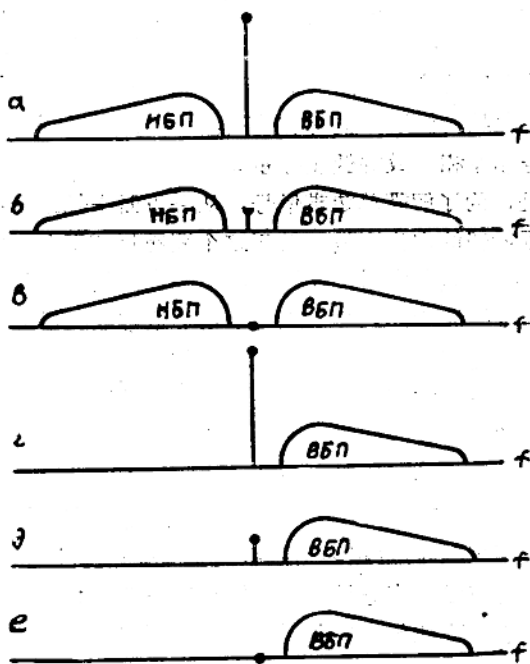


图 4 調幅信号頻譜及其变形

必須指出，如果說在調幅信号的情況下，「載波」这个術語多少可以从字义上来理解的話，那么对上面所列举的載波振盪被衰减了或完全被抑制了的信号类型这个術語就純粹只有假定的涵义了。

为了进行接收机的自动微調，自动增益控制以及单边带信号的解調，減弱的載波（「剩餘」載波）可作为控制信号（即所謂導頻信号）之用。

假如把信号与恢复载波电压一起加到普通的检波器上，便可实现单边带信号的解调。这个恢复载波电压是借专用的窄带滤波器滤出的《剩余》载波，进行适当放大后得到的。这时，检波器输入电压的频谱与图 4.2 所表示的一样。单边带信号与恢复载波经差拍检波后，就可在检波器输出端上得到与发射机中调制信号频率相一致的低频分量。

但是，为了解调单边带信号，从各方面来说最好使用接收机本地振荡器的本机载波。关于这个问题将在下面说明。

在普通无线电广播接收机中，不是将恢复载波或本机载波信号来进行检波的，因此它不能接收单边带电话信号。这就说明用单边带无线电波道进行通话具有相当好的《保密性》。

单边带信号的形成可看作是把低频信号的频谱向较高的频率方面搬移（沿频率标度移动）的结果。这种移动不会改变信号频谱各分量的相互位置，如图 4, e 所示。这种搬移或者同时伴有倒置（翻转）现象。如果单边带信号上限频率分量与调制信号的下限频率相对应（指频谱图中的位置——译注），或相反地，单边带信号下限频率分量与调制信号的上限相对应，在这种情况下往往有频率的倒置现象（或称为倒频现象——译注）。如果在图 4, e 上以频率的下边带来代替上边带，那么图 4, e 便可以当作倒置后的单边带信号的例子。

图 2 是单音调制时调幅信号的向量图。当由几个纯音同时调制时，则在这样的向量图上同时应表示出几对（三个纯音调制时为三对）边频向量，而每一对向量对称地位于载波向量的两旁（图 5, a）。如果载波向量模数等于零，便得到无载波的双边带的向量图（图 5, b），然后再除去其中一个边带，得到的便是无载波的单边带信号（图 5, c）。

现在，我们来研究一下不同信号与时间的关系图（波形图）。

先討論用單音 F 來調制的最簡單的情形(圖 6)，而後討論比較複雜的情形，即調制電壓中同時包含頻率 F 和 $3F$ 二個分量來調制的情形(圖 7)。

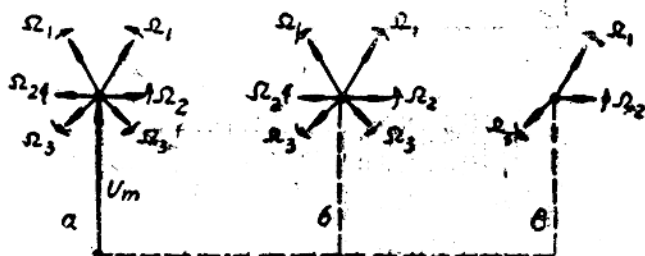


圖 5 由角頻率為 Ω_1 , Ω_2 和 Ω_3 所調制的信號向量圖

а) 一普通雙邊帶信號; б) 一無載波雙邊帶信號;
в) 一單邊帶信號。

圖 6 和圖 7 畫出了調制信號及與其相對應的調幅信號、無載波雙邊帶信號和單邊帶信號的波形圖。

單音 F 調制(圖 6)。用單音振盪 (圖 6, б) 進行調制時，調幅信號的波形，根據向量圖(圖 2)很容易畫出。在整個調制週期內，調幅信號包絡線的相位與調制信號的相位一致。

令載波向量模數等於零(圖 2)，我們便得到無載波雙邊帶信號的向量圖。留下的兩個反向旋轉的向量在一個週期內——

$T = \frac{1}{F}$ (即一轉) 有兩次算術迭加和兩次相互抵消。因此所得的

合成向量的模數是按正弦變化的，而在調制信號的半週期內，此合成向量的相位與被抑制了載波向量的相位相同，在另半個週期內相位則翻轉了 180° 。因為振幅的數值為正，所以無載波雙邊帶信號的包絡線是正弦曲線，正弦曲線的負半週周圍繞着時間軸旋轉 180° (換句話說，包絡線的相位與調制信號正半週同相，與調制信號負半週反相)。被包絡的高頻乃是頻率為 f_H 的

振盪，該高频振盪的相位，当調制电压通过零值时被倒向。如图 6, a 所示。

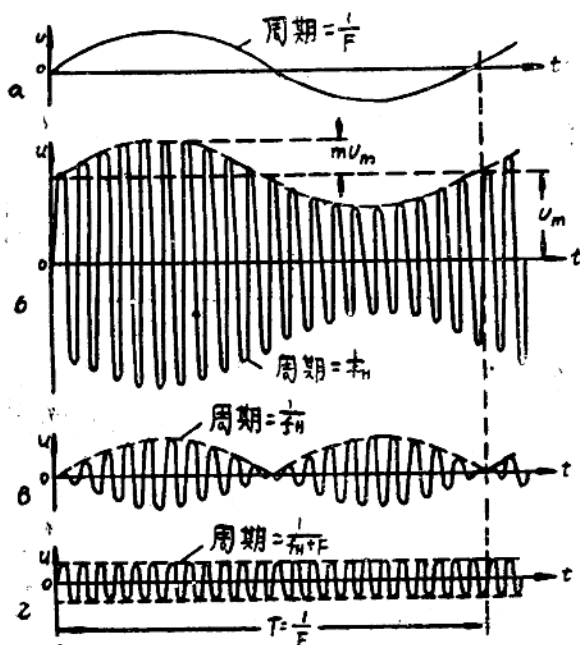


图 6 信号波形图

- a) — 調制信号； b) — 調幅信号；
c) — 无載波双边带信号；
d) — 无載波单边带信号。

在上述情形下，单边带信号波形图(图 6, d)是最简单的。因此单边带信号只包含一个振幅固定的频率分量。工作于上边带时，这个分量的频率就是 $f_H + F$ ，調制度越深，此频率分量的振幅也越大。

双音調制(图 7)。当調制信号越复杂时，波形图也就越复

杂。图 7, a 中用实线表示的调制信号是由两个振幅相同而频率各为 F 和 $3F$ 的信号迭加而成的。

調幅信号的包絡綫 (图 7, b) 按調制电压的規律而变化。調制电压和包絡綫的相位彼此相符合。这可以从比較未經調制的振盪的振幅看出, 正調制电压相应于信号振幅的增长, 而負的調制电压相应于信号振幅的減低。

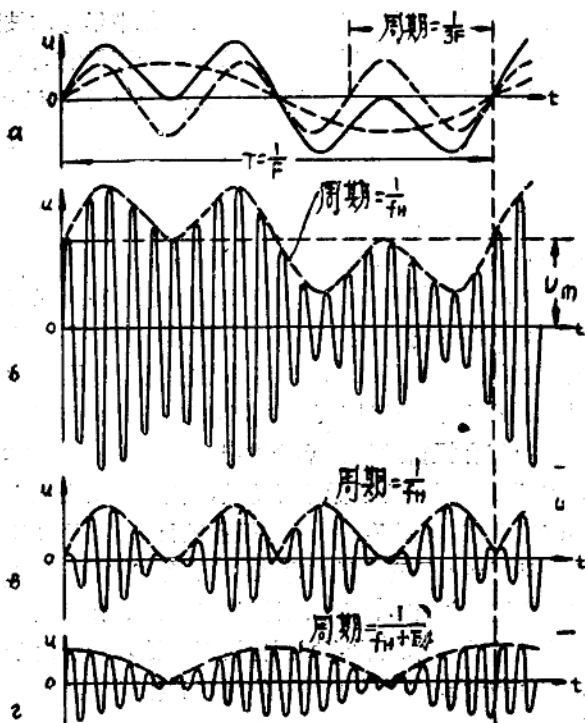


图 7 信号波形图

(a) — 双音調制信号; (b) — 調幅信号; (c) — 无載波双边带信号;
(d) — 无載波单边带信号。

使用前一种情况(图 6, a)所用过的法则, 很易画出无载波双边带信号的波形图: 在调制电压为正的这段时间内, 无载波双边带信号的包络线与调制电压同相, 而被包络的高频振荡的相位与被抑制了的载波同相; 在调制电压为负的这段时间内, 包络线的相位翻转(与调制电压相位差 180°), 并且包络线的相位翻转, 同时也发生被包络的高频振荡的相位翻转。根据这个法则, 可以画出调制信号形状任意时的双边带信号的波形图。

根据向量图很易画出单边带信号的波形图(图 7, z)。因为, 在上述单边带信号中, 含有两个振幅相同的单边带信号分量 $f_H + F$ 和 $f_H + 3F$, 所以对它的平均中心频率 $f_H + 2F$ 画制这种信号的向量图与单音调制的无载波双边带信号之向量图相似, 其波形图也相似。不同的只是被包络的高频频率不同; 单音调制时为 f_H , 而双音调制时为平均中心频率 $f_H + 2F$ 。

应当注意粗看起来不大正常的这样一个事实: 在图 6, a 和 7, z 上所示的复合振荡的频率中, 没有载波分量(在这个波形图上都是“被包络”的频率), 与复合振荡频率分量中的情形一样, 图 7, z 所示的波形图上也没有 $f_H + 2F$ 的频率分量。

把这种复合振荡进行直接检波, 只能得到一个失真的信号。例如, 对图 6, z 所示的振荡进行检波, 检波器输出端上得到的是已整流电压, 对图 7, z 所示的振荡进行检波, 检波器输出端上得到的是低频 $2F$ 及其谐波电压, 而不会有 F 和 $3F$ 的电压分量。如上所述可知, 为了对单边带信号进行正确的解调(检波), 必须把恢复载波或本地载波加到检波器的输入端。由于单边带信号与恢复载波或本地载波相互作用形成拍频, 其差拍频率等于调制频率。

研究上述各波形图可以得出结论: 单边带信号的特点是其包络线和调制信号的形状不相符合(对于调幅信号, 其包络线

和調制信号的形状完全符合)。因此,进行振幅調制时,单边带信号的包絡綫不能重现調制信号的形状;調制信号和单边带信号之間只在强度(平均电平)上保持一定的比例关系。

2. 某些綫路的工作原理

在单边带无綫电設備中,基本上採用普通无綫电設備中常用的各級电路:低頻放大器和高頻放大器、振盪器(本地振盪器)、晶体滤波器或不用晶体的滤波器(如 LC 滤波器和机械滤波器)等。当然,对这些綫路有一些特殊的要求,如良好的直綫性,稳定性和滤波度等。至于这些綫路的工作原理是每一位无綫电工作者都已掌握的,因此,我們不予討論。在这一节中,我們簡單介紹一下通常較少见而不太熟悉的两个綫路——复杂混頻器和相移器——的工作原理。因为,这两个綫路在单边带发送設備和接收設備中都要使用。

我們假定把信号变換級叫做調制器和解調器(检波器),則由发射机微音器所得到的原始低頻信号为調制器的輸入信号,而由接收机耳机中听到的低頻信号相应为解調器的輸出信号。同时,把所有其它的《調制器》和《检波器》都称为混頻器或变頻器較為妥当;因为其中只发生頻率的变換,信号頻譜向較高的(在发射机中)或較低(在接收机中)頻率方面搬移并不改变調制的形式和調制規律。

只具有一个非綫性元件——电子管或半导体管的混頻器叫做单元件混頻器或簡單混頻器,具有两个或两个以上非綫性元件的混頻器称为多元件混頻器或复杂混頻器。通常,綫路越复杂,所用的非綫性元件越簡單。因此,最常用的是不消耗电源的半导体二极管。

现在，让我们讨论一下，用半导体二极管作非线性元件的复杂混频器〔5〕的工作原理。我们采用可控电阻法，其实质是把非线性元件看作一个可控电阻。可控电阻的大小取决于控制电压的极性，这个控制电压是一个比信号大的本地振荡电压 u_T 。图 8 表示半导体二极管的理想伏安特性曲线和相应的二极管电阻特性。

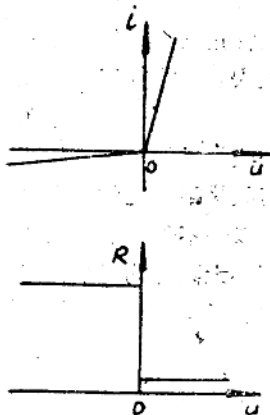


图 8 半导体二极管的理想伏安特性曲线和理想电阻—电压关系曲线

如果在二极管上的电压为正时，二极管的电流越大，负电压时电流越小，即这时二极管电阻值的差别越大，则二极管的整流特性非线性就越好。为了便于说明复杂混频器的工作原理，我们假定在正电压区域内二极管的电阻很小，而负电压区域内，二极管的电阻很大，以致可以把装置在电路上的二极管看作通路（当 $u > 0$ 时）或断路（当 $u < 0$ 时）。

平衡混频器的线路如图 9 所示。在这个线路中，两只二极管电路中接有两个具有中心抽头的变压器绕组。在两个中心抽头之间加本地振荡电压。

我们假定，在电气上，线路与中心点对称。当本地振荡器的电压在正半周时，两个二极管同时通路，而在负半周时都断路。在没有输入信号电压 ($u_{sx} = 0$) 时，二极管在本地振荡电压正半周作用下周期地产生电流，由于线路对称，所以上下两个二极管回路的电流相等，这两个电流从左端沿相反的方向流出，然后又沿相反的方向流向右端。由于电流在变压器的两个半边

繞組里的流向是相反的，所以它們產生的磁場便相互抵消，或

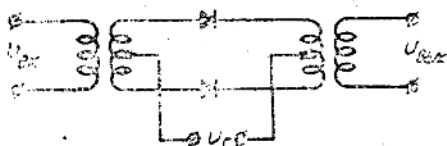


图 9 平衡混頻器(BG)的綫路图

者說相互平衡（綫路由此而得名），因此在平衡混頻器的輸入端和輸出端上不会产生任何作用。总之，无信号时，在平衡混頻器的对称綫路中本地振盪器本身無論如何也不进行工作。因此，二极管回路中本地振盪器所产生的电流没有什么意义。本地振盪器的作用只是使二极管回路周期地通路和断路。当本地振盪器的电压为負半周时，輸入和輸出变压器繞組之間的耦合被消除，而在正半周时重新恢复。

有輸入信号电压时，輸入变压器的次級繞組內产生电动势（图 10, a）。由于該电动势的作用，在本地振盪器电压为正半周（图 10, e）的时间內，二极管回路中流过如图 10, b 所示的电流。图 10, e 的电流波形图可說明如下。

值得注意的是另一种平衡混頻器，它有四个二极管构成，如图 11 所示。由于二极管連接成电桥形式，因而可把这种綫路叫做桥式混頻器。这种混頻器的优点是繞組不需要中心抽头。

桥式混頻器的工作原理和平衡混頻器的原理差不多，所不同的是：首先，当本地振盪器电压为正半周时，輸入变压器和輸出变压器繞組之間耦合被消除（四个二极管的电阻都很低），而在負半周时，繞組之間的耦合恢复（二极管的电阻都很高）。

如果送入信号，当本地振盪器电压为正半周时，輸入变压器初級繞組中沒有电流，而在負半周內才有电流流过（见图 10, z）。

这样,桥式混频器的电流波形与图 10,6 所示的电流波形有些不同。为了便于辨别图 10,6 和 10,2 图的差别,把电流脉冲打上阴影线。其次,当电桥对称(平衡)时,本地振荡器不会在接于电桥对角线的变压器绕组中产生电流。

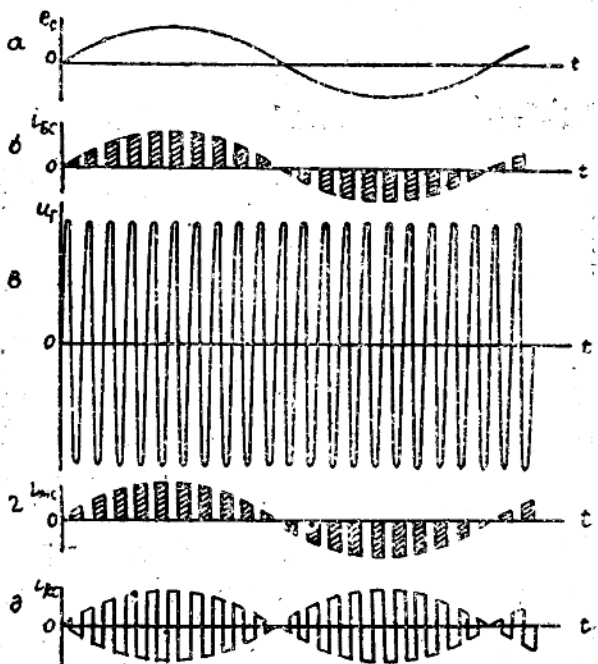


图10 信号波形图

- a) — 信号电动势波形;
- б) — 平衡混频器输出端的脉冲电流波形;
- в) — 本地振荡电压波形;
- г) — 桥式混频器输出端的脉冲电流波形;
- д) — 环形混频器输出端电流波形。