

## 第三章 微波中继通信系统

### 本章要点:

- 微波中继通信的概念
- 微波中继通信系统的组成
- 微波中间站的转接方式
- 数字微波中继通信系统设计中的若干问题
- 微波传播特性与微波线路设计

微波通信是二战后开始使用的一种无线通信技术。

主要用于地面远距离长途通信，需中继站。

分为模拟微波和数字微波两种。

与卫星通信、光纤通信一起作为当今三大传输手段。

## 3.1 微波中继通信的概念

**微波中继通信**——利用微波作为载波并采用中继方式在地面上进行的无线电通信。

限定在地面为了与卫星通信进行区分，卫星通信也使用微波。

**微波**：频段的波长范围为  $1\text{m} - 1\text{mm}$ ，频率范围为  $300\text{MHz} - 300\text{GHz}$

### 远距离地面微波中继通信系统

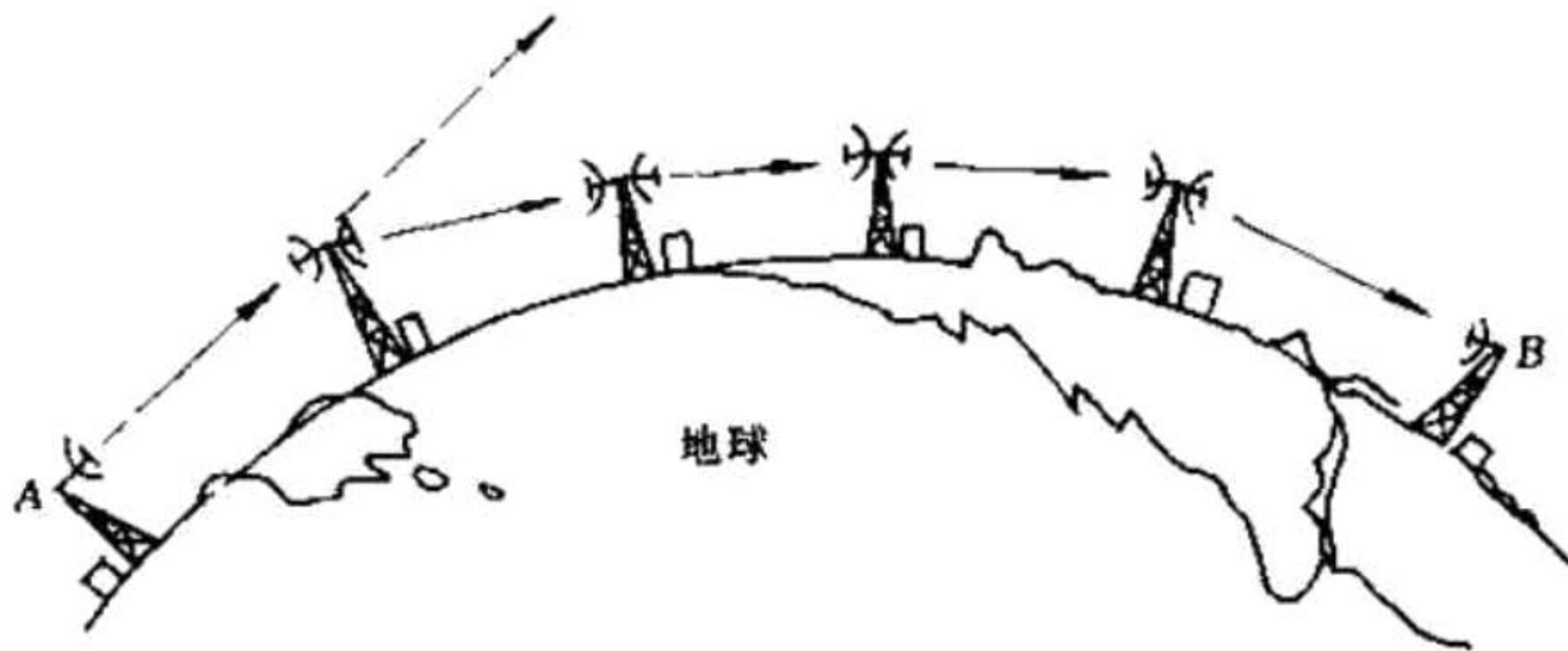


图 3-1 微波中继通信的中继示意图

## 采用中继方式的原因

- 微波的视距传播特征
- 地球表面的曲率问题
- 传输损耗

## 微波中继通信的特点

- 通信频段的频带宽  
约 300G，可承载大量业务。
- 受外界干扰（工业干扰、天电干扰及太阳黑子的活动）的影响小。  
工业干扰、天电干扰及太阳黑子的活动主要影响 100M 以下信号。
- 通信灵活性较大  
通信距离远，可跨越沼泽、江河、湖泊和高山等，灾害时建立和撤收方便。
- 天线尺寸小、增益高、方向性强  
当天线面积给定时，天线增益与工作波长的平方成正比。  
方便制成高增益天线，且可以具有很强的方向性。

- 投资少、建设快

按话路公里计算，费用不到铜轴电缆一半。节省有色金属，建设周期短。

### 微波通信业务

- 长途电话传输业务
- 宽带信号（电视信号）传输业务
- 大容量数据传输业务
- 移动通信系统基站与交换中心互连
- 通向孤岛等特殊地形的通信线路。
- 内河船舶电话系统。
- 点对多点系统
- 专用网

### 3.2 微波中继通信系统的组成

#### 微波中继通信线路示意图

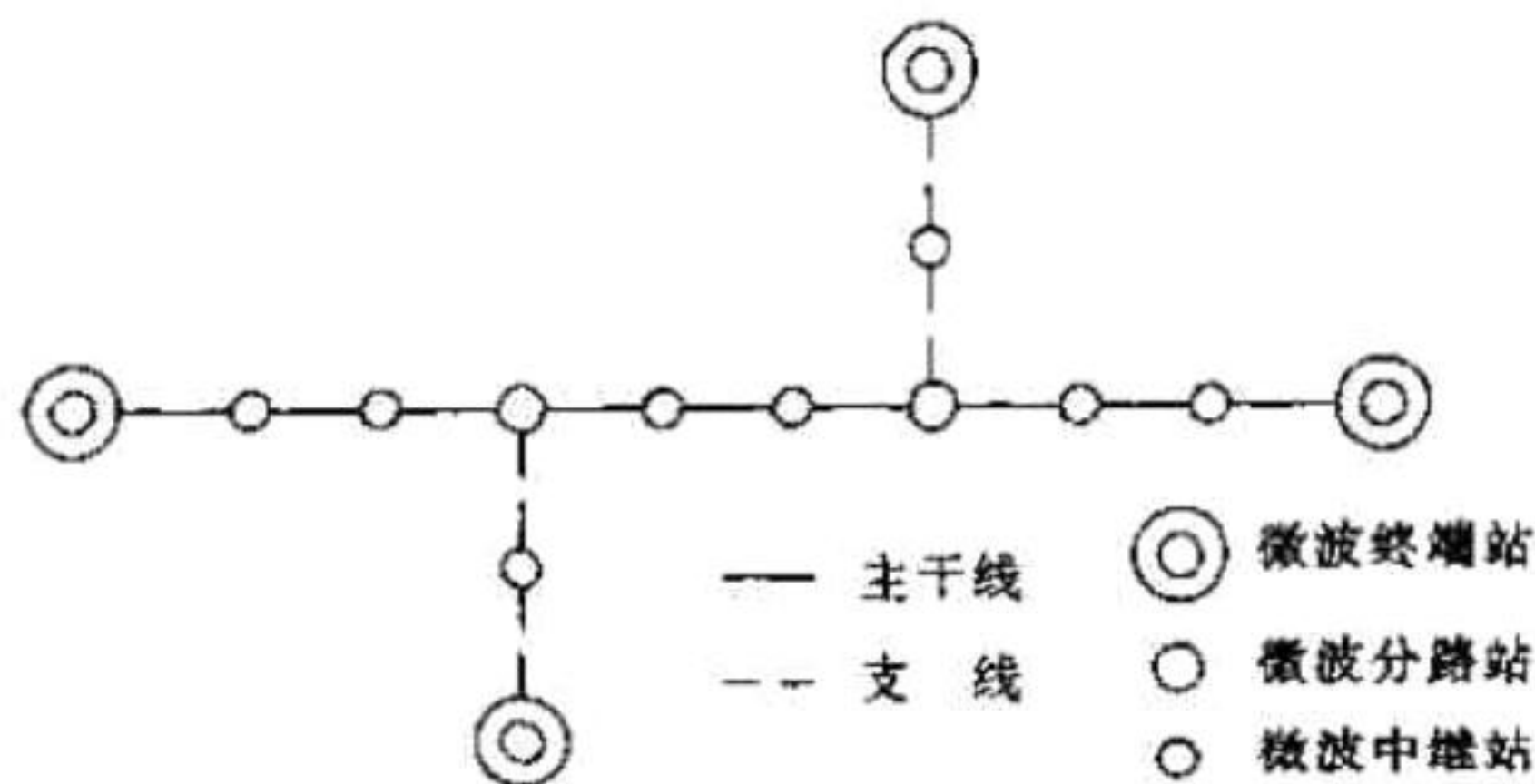


图 3-2 微波中继通信线路示意图

可长达几百至几千公里，支线可以有几条；

线路末端设微波站，中间设微波中继站和微波分路站。

### 微波中继通信系统设备连接方框图:

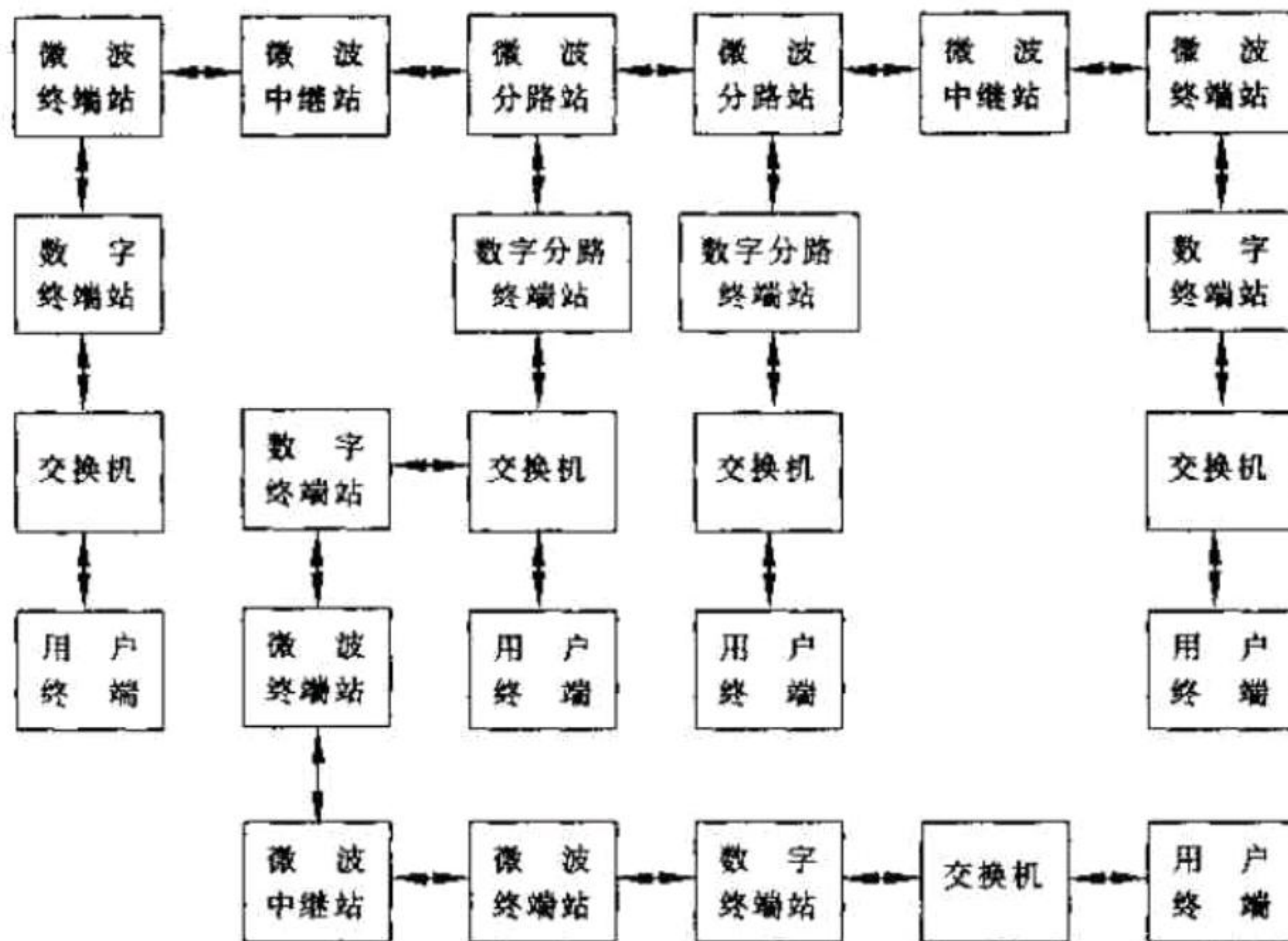


图 3-3 微波中继通信系统设备连接方框图

## 微波中继通信系统主要设备

### ■ 用户终端

通过交换机集中在微波终端或微波分路站;

包括自动电话机、电传机、计算机、调度电话等。

### ■ 交换机

实现用户终端之间的业务互通(本地或异地);

配置在微波终端站或微波分路站。

### ■ 终端复用设备

基本功能: 将交换机送来的多路信号或群路信号适当变换, 送到微波终端站或微波分路站的发信机, 或相反。

可以是频分多路载波机(模拟微波)或时分多路数字终端(数字终端)。

### ■ 微波站

基本功能: 传输来自终端复用设备的群路信号。

按照与终端复用设备的连接关系, 分为终端站、分路站、中继站。

枢纽站: 两条以上微波中继通信线路的交汇站。

微波分路站和枢纽站统称为主站。

下图是微波终端站和微波中继站示意图。

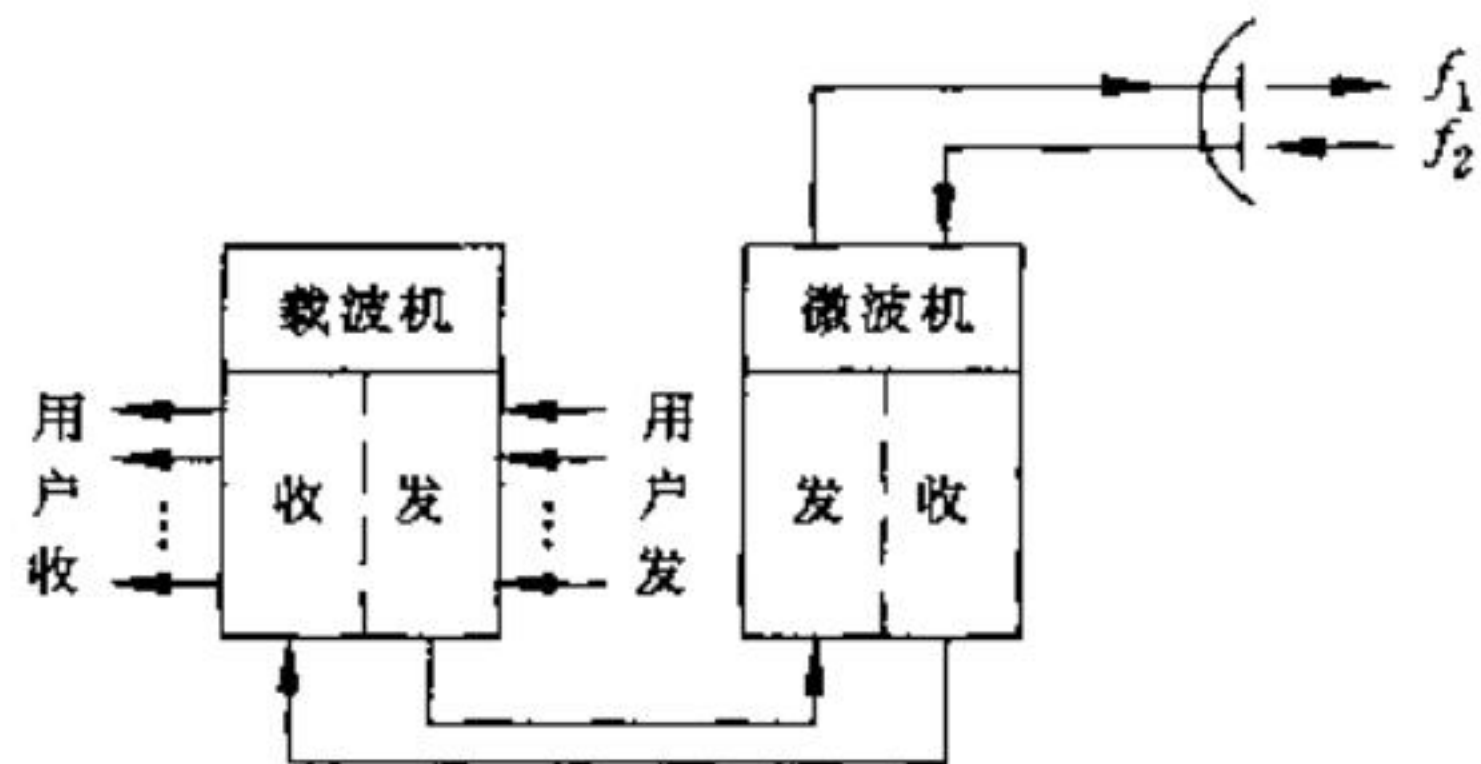


图 3-4 微波终端站结构示意图

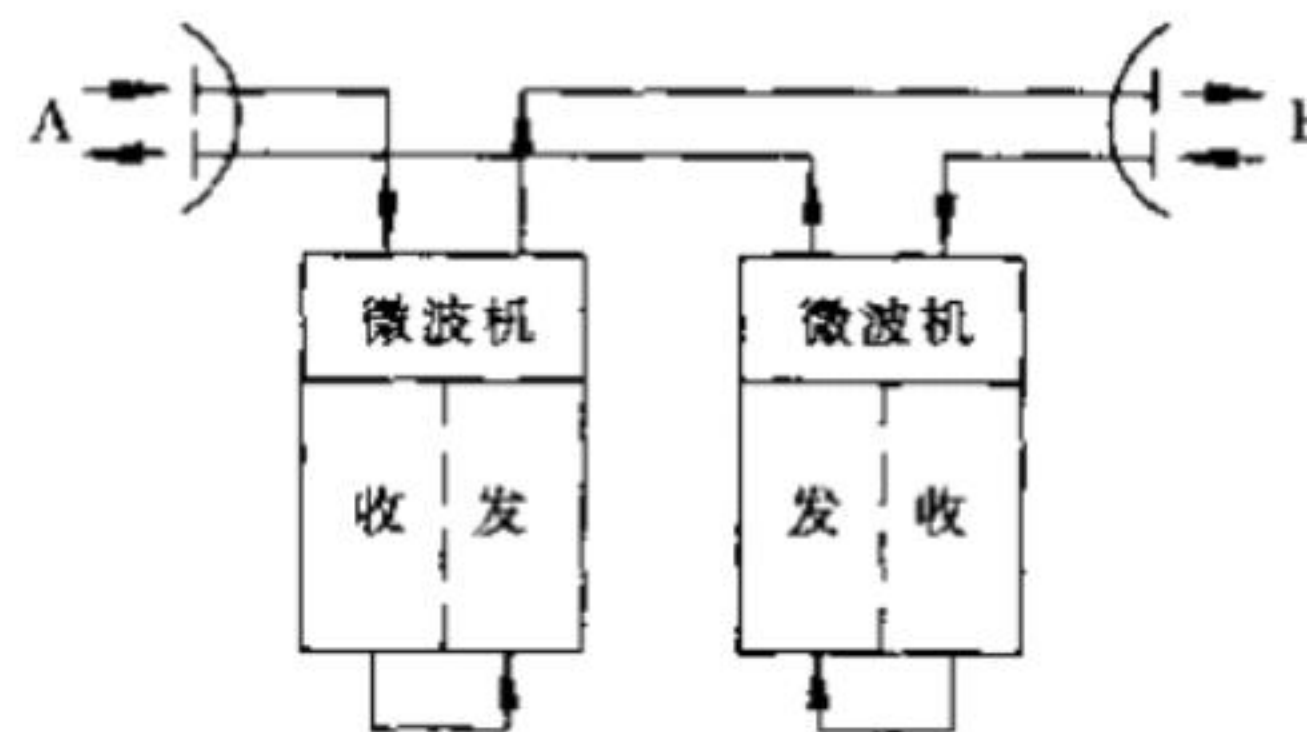


图 3-5 微波中继站结构示意图



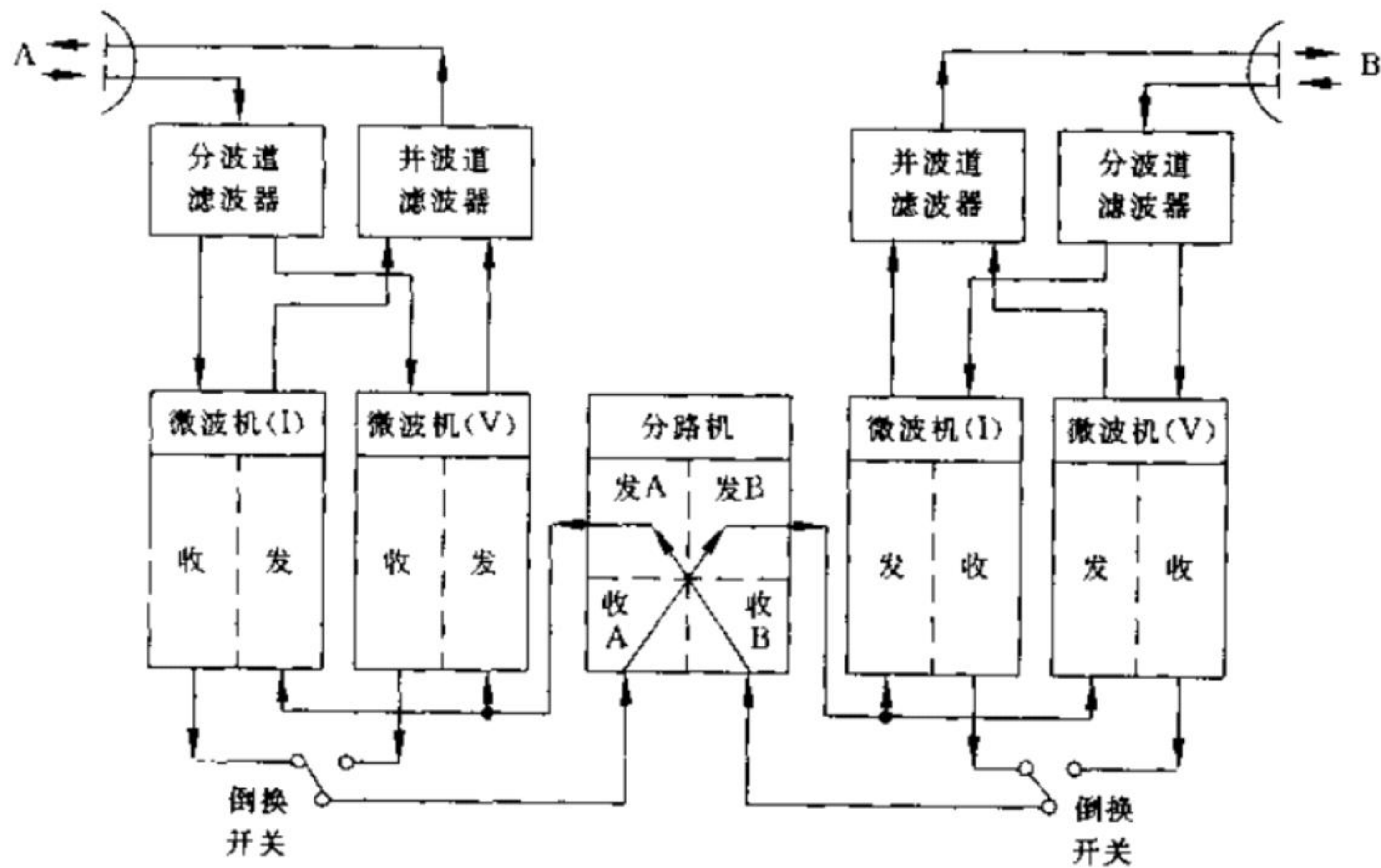


图 3-6 微波主站单向机系统连接示意图

## 3.3 微波中间站的转接方式

按照收发信机转接信号时的接口频带划分。

主要分三种：基带转接方式、中频转接方式、微波转接方式。

此外还有：微波直放转接方式、无源转接方式。

### 1 基带转接方式

中间站把接收信号解调为基带信号，然后再调制到另一个载频的微波上。

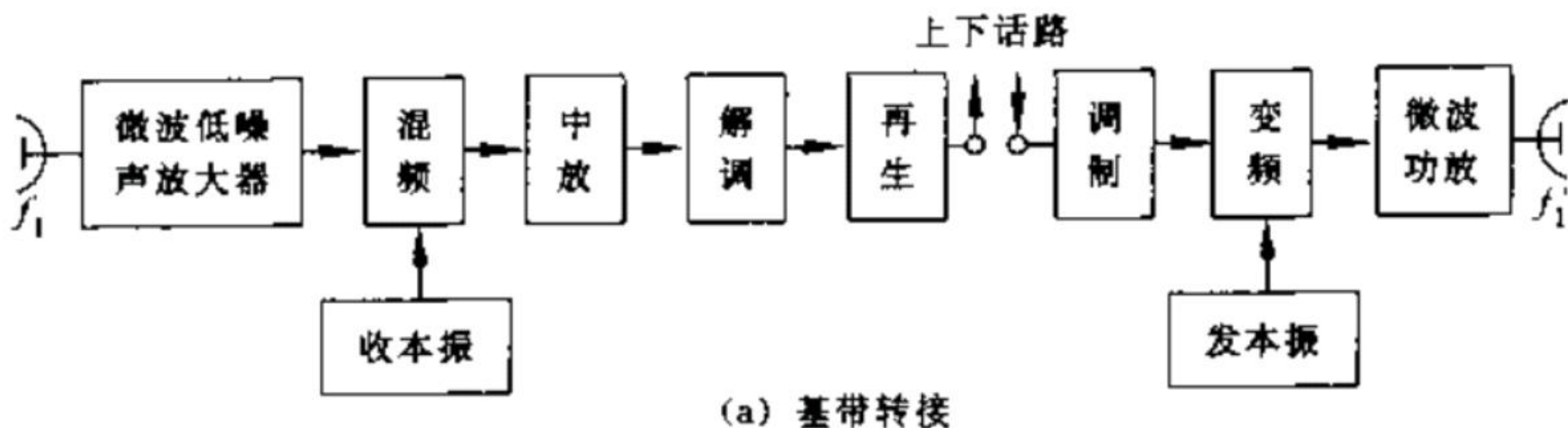
模拟微波中继通信系统的基带转接称为群频转接，中间站数目的增加会使失真和噪声积累；

数字微波中继通信系统的基带转接称为再生转接，可消除噪声积累。

**优点：**

可直接上下话路，微波分路站和枢纽站必须采用。

**缺点：**复杂。



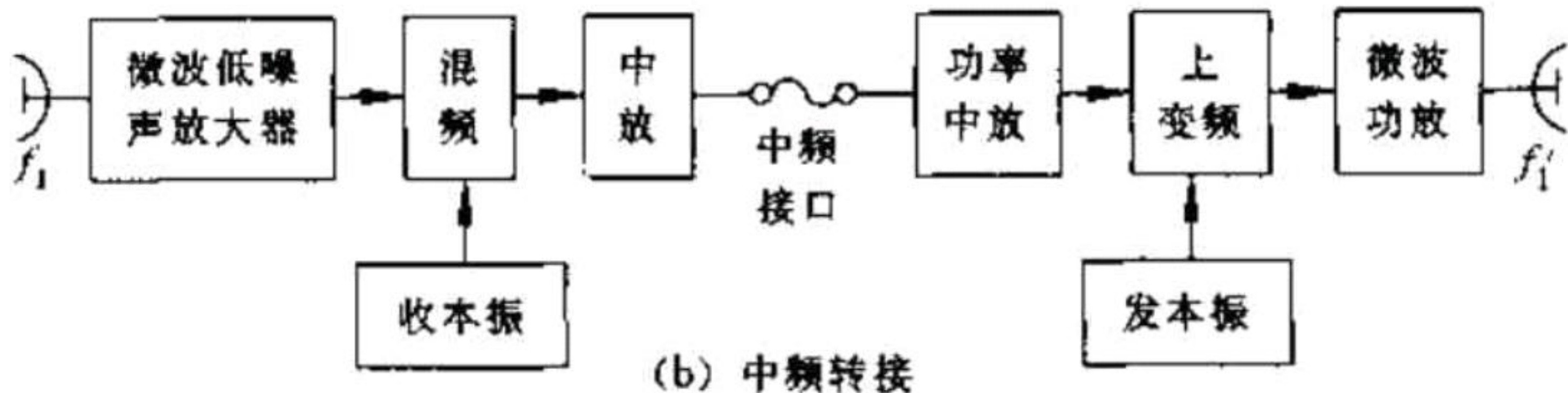
## 2 中频转接方式

接收信号经混频得到中频，经中频放大后转接。

**优点：**省去了调制、解调器，简化了设备，没有调制解调引入的失真和噪声。

**缺点：**不能上下话路，不能消除噪声积累。

模拟系统中继站常用。

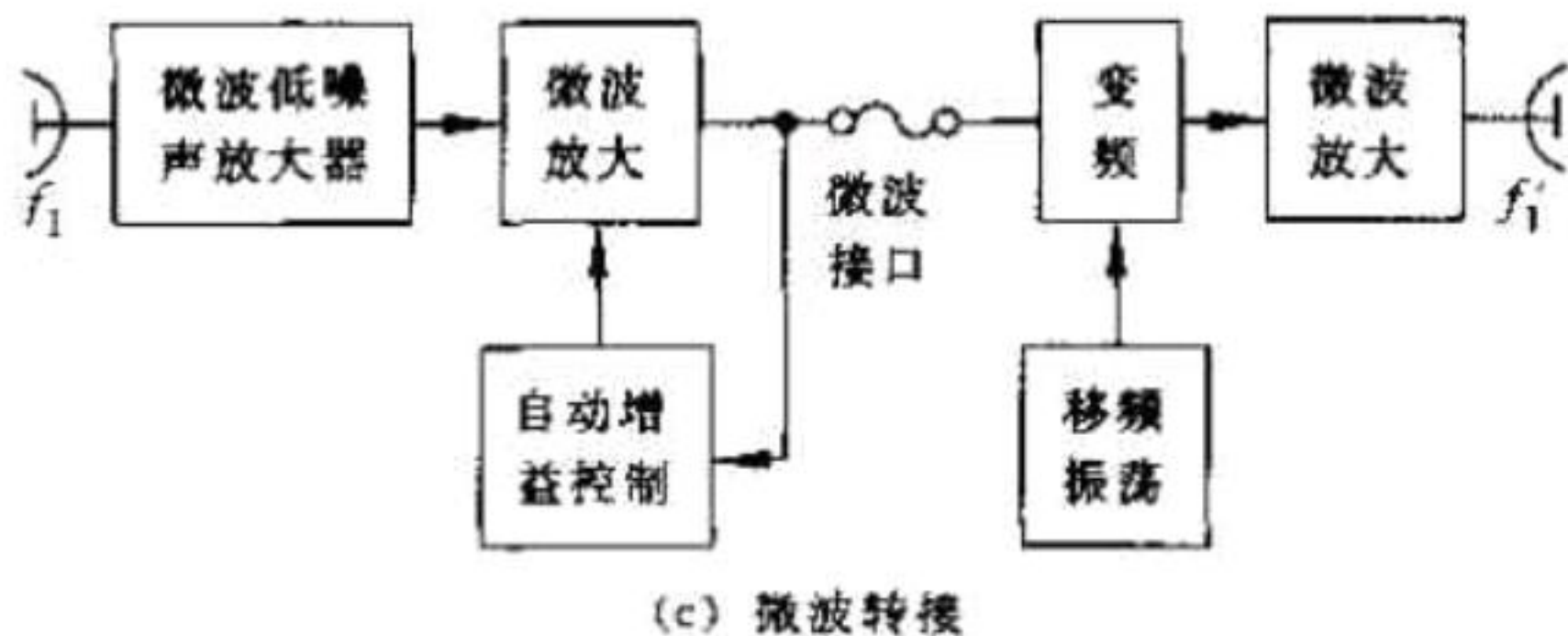


### 3 微波转接方式

接收微波信号经变频后直接发射。

**优点：**转接方案简单，设备体积小功耗低。

**缺点：**实现比中频方案要求高，不能上下话路。



#### 4 微波直放转接方式

以微波宽带低噪声放大器、微波宽带线性功率放大和微波分路滤波器等器件为基础，进行有源、双向、无频率变换的微波信号直接放大，适用于模拟微波中继通信和数字微波中继通信。

**优点：**结构简单，体积小，功耗低，可靠性高，不需要基础建设。

**缺点：**转信和收信同频，容易产生相互干扰。需增益高、方向性强、旁瓣低、前背比高的天线，或加大天线之间的垂直间距。

#### 5 无源转接方式

利用金属反射板改变微波波束的方向。

**优点：**维护简单，主要用于克服山河等地形障碍。

**缺点：**反射板的抗风能力要求很高，造价很高。

## 3.4 数字微波中继通信系统设计中的若干问题

- 假设参考电路与传输质量标准
- 传输容量与基带接口
- 调制方式的选择
- 射频波道的频率配置
- 中频频率的选择

### 3.4.1 假设参考电路与传输质量标准

#### 1、假设参考电路

为了便于考察各种实际数字微波中继通信线路的传输质量，可以事先假设数字微波中继通信电路(线路)并规定其传输质量，作为实际线路的参考，称为假设参考电路。

**数字微波段的概念：**指相邻两组数字复用设备之间的区段，一个数字微波段可以包含若

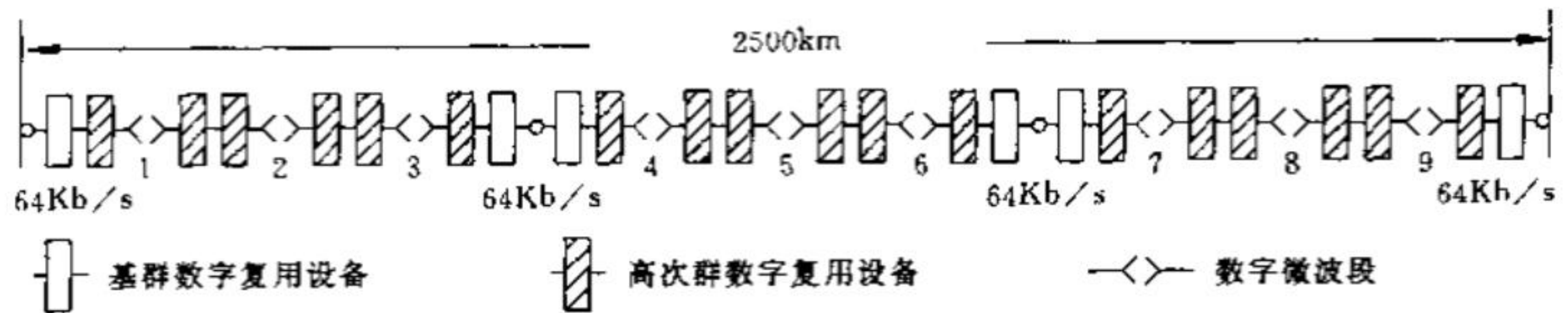
于个微波中继段。

## 2、假设参考电路等级

共有三类：

### (1) 高级假设参考电路

- ◆ 传输容量在二次群 (8Mb / s) 以上；
- ◆ 总长度为 2500 km，
- ◆ 均匀分为 9 个数字微波段
- ◆ 包含两次 64Kb / s 数字信号转接 (音频转接)，其他转接为群转接；
- ◆ 适用于国际与国内的远距离微波干线通信



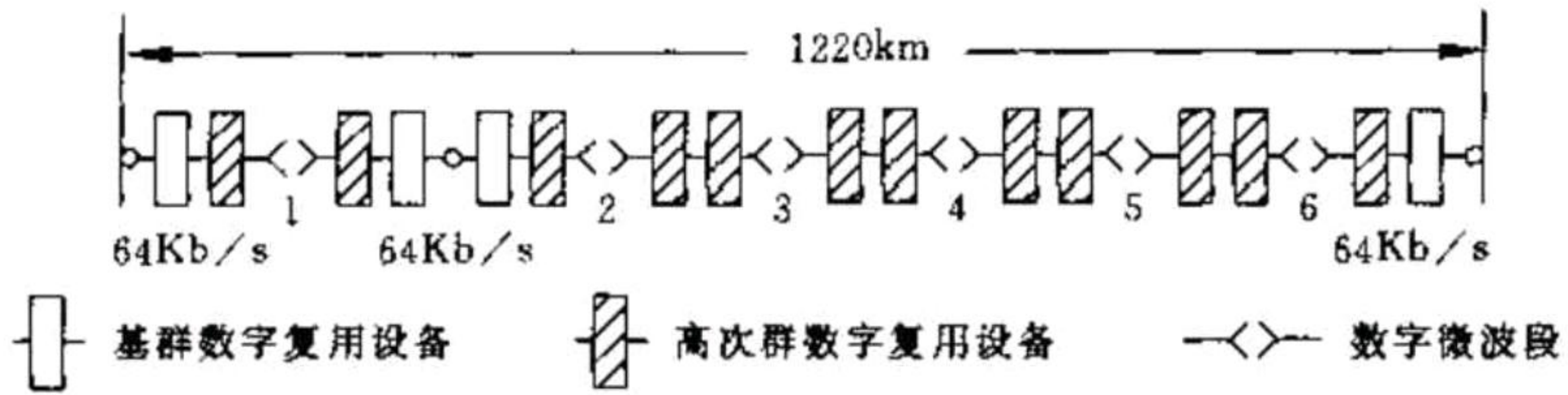
(a) 高级假设参考电路

### (2) 中级假设参考电路

- ◆ 传输容量在二次群 (8Mb / s) 以上;
- ◆ 总长度为 1220 km;
- ◆ 由 4 类传输质量不同的假设参考数字微波段组成;

第一、第二类长度 280 公里, 第三、第四类长度 50 公里。可根据情况组合, 长度不限于基本长度 1220 公里。

- ◆ 包含 1 次 64Kb / s 数字信号转接(音频转接), 其他转接为群转接;
- ◆ 适用于国内微波支线通信

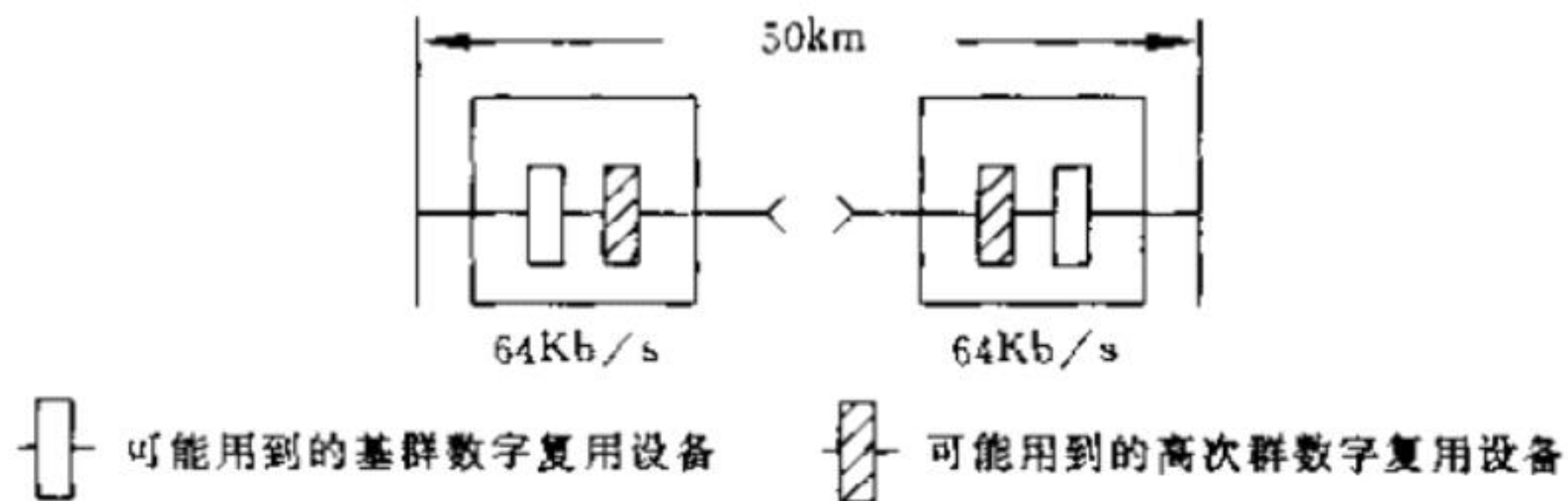


(b) 中级假设参考电路



### (3) 用户级假设参考电路

- ◆ 用户级假设参考电路的长度为 50Km
- ◆ 主要用于本地数字交换端局与 64Kb/s 用户之间的微波通信。



(c) 用户级假设参考电路

### 3、传输质量标准

- 性能评价指标：参考电路 64Kb/s 数字信号输出端(音频输出端)的误码性能。
- 恶化分：统计误码率超过某一数值（如  $10^{-5}$ ）的 1 分钟。
- 严重误码秒：统计误码率超过某一数值（如  $10^{-3}$ ）的 1 秒钟。
- 误码秒：出现 1 个以上误码的秒。

### (1) 高级假设参考电路的误码性能

- 在一年中的任何月份，恶化分 ( $BER > 10^{-6}$ ) 时间率不能超过 0.4%。

这时的误码主要是设备性能不完善和干扰等因素造成的。

- 在一年中的任何月份，在 1 秒钟统计时间内，严重误码秒 ( $BER > 10^{-3}$ ) 时间率不能超过 0.054%。

这时的误码主要是传播衰落造成的。

- 在一年中的任何月份，误码秒时间率不能超过 0.32%。

这时的误码主要是设备性能不完善造成的。

### (2) 中级假设参考电路的误码性能

- 在一年中的任何月份，恶化分 ( $BER > 10^{-6}$ ) 时间率不能超过 1.5%。

- 在一年中的任何月份，在 1 秒钟统计时间内，严重误码秒 ( $BER > 10^{-3}$ ) 时间率不能超过 0.04%。

- 在一年中的任何月份，误码秒时间率不能超过 1.2%。

### (3) 用户级假设参考电路的误码性能

- 在一年中的任何月份，恶化分 ( $BER > 10^{-6}$ ) 时间率不能超过 0.75%。
- 在一年中的任何月份，在 1 秒钟统计时间内，严重误码秒 ( $BER > 10^{-3}$ ) 时间率不能超过 0.0075%。
- 在一年中的任何月份，误码秒时间率不能超过 0.6%。

## 3.4.2 传输容量与基带接口

### 1、传输容量

按照 CCITT 规定，数字微波中继通信系统的传输容量以 PCM 数字复用设备的基带信号容量（即电话路数）来区分。

西欧各国采用 PCM-30/32 路系列，日本和北美采用 PCM-24 系列。

我国基本采用前者。

表 3-2 PCM-30/32 路系列和 PCM-24 路系列

系 列	传输等级	标称话路数	比特率(Mb/s)	比特组成(Kb/s)
PCM 30/32 系列	基群	30	2.018	32 × 64
	二次群	120	8.448	1 × 2048 + 256
	三次群	480	34.368	1 × 8448 + 576
	四次群	1920	139.264	4 × 34368 + 792
	五次群	7680	564.992	1 × 139264 + 7986

系 列	传输等级	标称话路数	比特率(Mb/s)	比特组成(Kb/s)
PCM 24 系列	基群	24	1.544	24 × 64 + 8
	二次群	96	6.312	1 × 1544 + 136
	三次群	480(日)	32.064	5 × 6312 + 504
		672(美)	44.736	7 × 6312 + 552
	四次群	1440(日)	97.728	3 × 32064 + 1532
		4032(美)	274.176	6 × 44736 + 5760
	五次群	5760(日)	397.200	4 × 97728 + 6288

为适应用户对不同电话路数的需求,我国还在 PCM-32 路系列的基础上增加了几种中间等级的非标准 PCM 路数,如 PCM-60, PCM-240, PCM-960 等。

表 3-3 我国数字微波中继通信系统的传输容量系列

类 别	比 特 率	标称话路数
四次群	139.264Mb/s	PCM 1920
二个二次群(非标准)	$2 \times 31.368\text{Mb/s}$	PCM 960
三次群	31.368Mb/s	PCM 480
一个二次群(非标准)	$2 \times 8.148\text{Mb/s}$	PCM 240
二次群	8.148Mb/s	PCM-120
二个基群(非标准)	$2 \times 2.048\text{Mb/s}$	PCM-60
基群	2.048Mb/s	PCM-30/32 或 $\Delta\text{M}64$
子群 1	1.024Mb/s	$\Delta\text{M}32$
子群 2	512Kb/s	$\Delta 16$
子群 3	256Kb/s	$\Delta 8$

## 2、基带接口

指数字复用设备与微波信道设备之间、再生转接中继站和收发信机之间的接口。

基带接口参数是数字微波中继设备的一项重要指标。必须标准化。

### (1) 基带接口的两种形式

近距离接口：20米左右，射频电缆直接相连。

远距离接口：需要连接的设备较远时使用射频电缆或同轴电缆相连，需要在发端将信码转换为适合线路传送的码型（如HDB3码）。

### (2) 基带接口需要考虑的因素

- 。信号形式，包括速率、码型、波形、信码和定时的时间关系等；
- 。阻抗和回波损耗；
- 。峰—峰电压和电平过冲值；
- 。定时抖动特性；
- 。信息码流的统计特性；
- 。附加的比特数（误码测量和勤务信号传送）和插入方式。

### 3. 4. 3 调制方式选择

#### 1、微波发信机的两种调制方案

##### (1) 射频调制:

来自数字复用设备的信码经过码型变换后,对微波振荡器输出的射频载波信号进行调制,已调信号经过微波功放和滤波后通过天馈系统发送出去。

**优点:** 发信机结构简单。

**缺点:** 微波功率放大器的制作难度较大,通用性也较差。

##### (2) 中频调制:

来自数字复用设备的信码经过码型变换后,对中频振荡器输出的中频载波信号进行调制,已调信号先经过功率中放、上变频,再经过微波功放和滤波后通过天馈系统发送出去。

**优点:** 通用性好。

**缺点:** 发信机结构较射频调制方案复杂。

## 2、调制方式选择

**主要调制方式：**M-ASK、M-PSK、M-FSK、M-QAM

**选择依据：**频谱利用率、抗干扰能力、对传输失真的适应能力、抗衰落能力、设备的复杂程度。

参见教材 P83。

### 3.4.4 射频波道的频率配置

为增加通信容量，通常使用多套微波收发信机同时工作。

**射频波道的频率配置：**即如何选择相邻两微波站各射频波道收发信机的微波收发频率。

**配置原则：**

尽可能在给定的微波波段内多安排一些波道，以增加传输容量；

尽可能减小波道间相互干扰；

尽可能有利于通信设备的标准化、系列化生产，以便于维修和降低成本。



### 1、单波道频率配置

- 相邻两微波站之间只有 1 条波道工作
- 配置方案：

二频制：频谱利用率高，但存在越站同频干扰和反向干扰。

四频制：频谱利用率降低一半，但没有反向干扰。

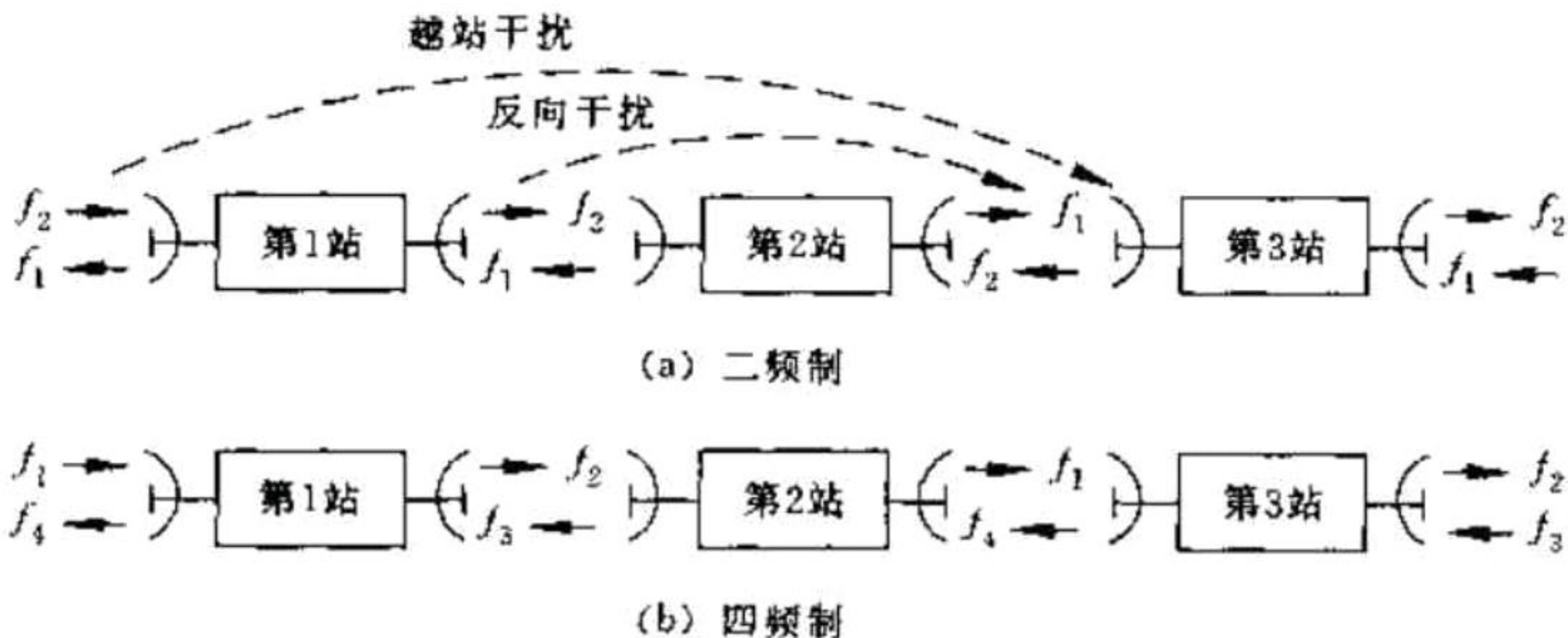


图 3-11 单波道的二频制和四频制频率配置

## 2、多波道频率配置

相邻两微波站之间有多条波道同时工作。

应参照 CCIR 的有关建议配置频率。

配置方案：交错制方案、分割制

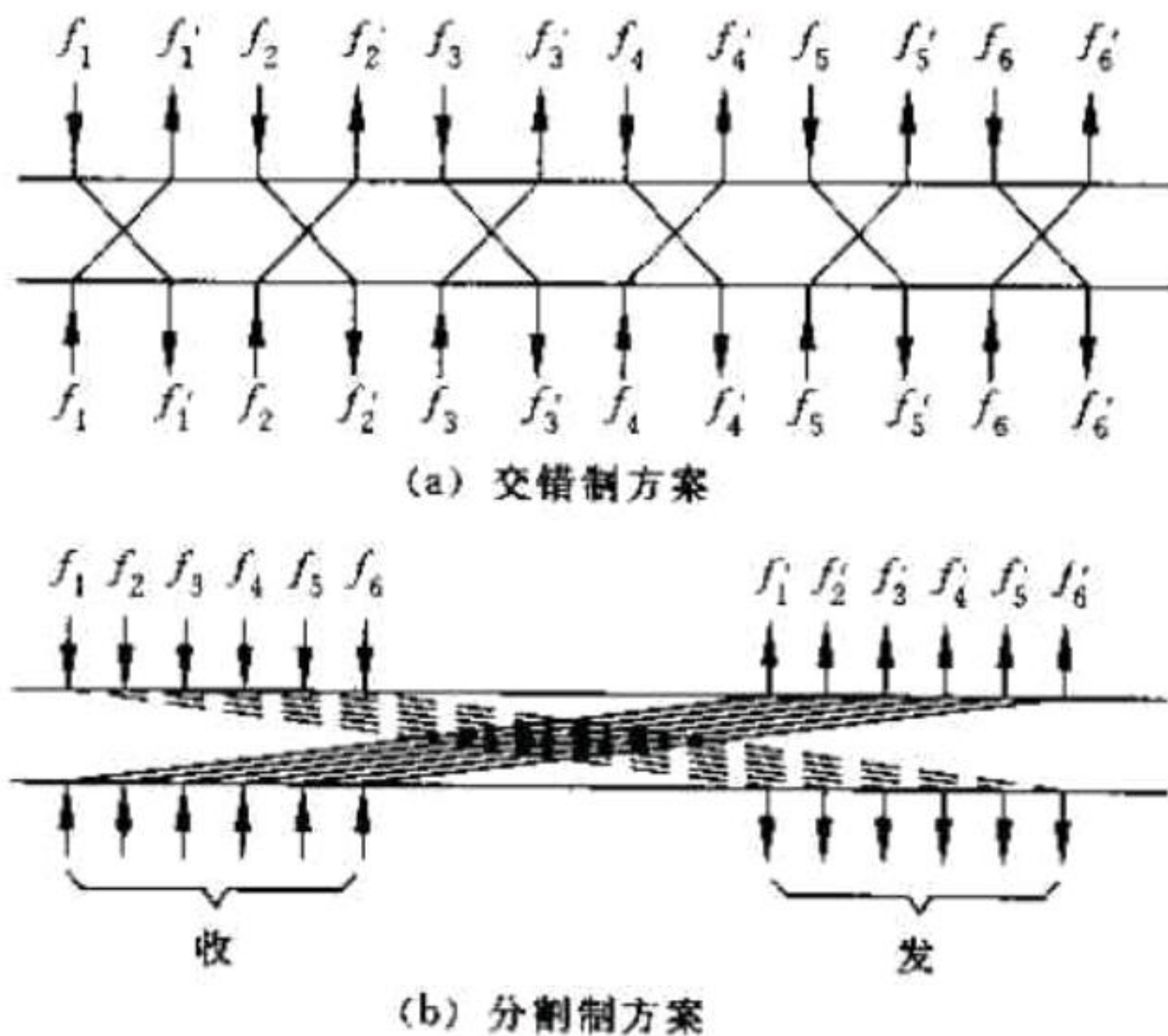


图 3-12 多波道频率配置的两方案

### (1) 交错制方案

同一波道的收信频率和发信频率相邻排列;

6 条波道的收发频率按波道号交错排列;

收发频率逐站更换一次;

相邻波道频差是同波道收发频差的两倍, 容易实现分波道滤波, 但同波道收发的分离对滤波器要求较高;

收发频率布满整个频段, 收发天线很难做到宽频带内的匹配, 各中间站需多副天线。

### (2) 分割制方案

收信和发信频率分别集中在半个频段内, 且逐站更换;

同一波道收发频率间隔较大, 易实现收发隔离;

收发天线只需在半个频段内进行阻抗匹配;

波道数不多于三个时, 收发天线可以共用;

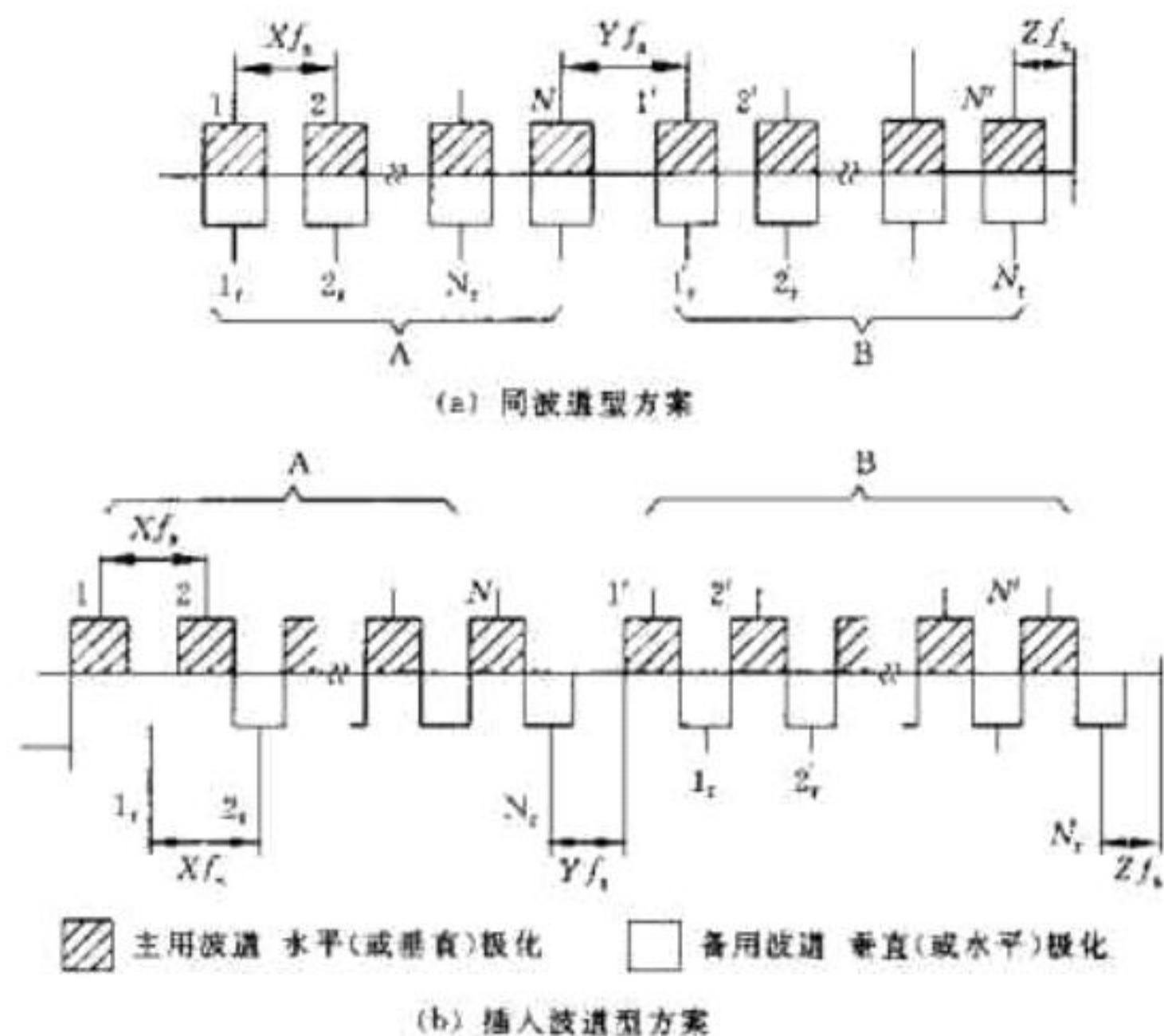
微波中继通信系统多采用分割制方案。

### 3、数字微波中继通信系统的波道频率再用

目的：提高频率资源利用率，增加传输容量

再用方案：

- 同波道型方案：再用频率与主用频率相同，利用不同极化方向安排射频波道。
- 插入波道型方案：再用频率与主用频率相互错开，且极化方向不同。



### 3.4.5 中频频率的选择

数字微波中继通信系统中频频率的选择主要与码元速率的高低有关。

定义中频频率与码元速率的比值,  $k_f = \frac{f_0}{f_s}$ 。

其中  $f_0$  为中频频率,  $f_s$  为码元速率。

$k_f$  表示单个码元(符号)周期内包含中频周期个数, 一般取 3~10。

#### 常用中频:

常用 70M 和 140M。

二次群和三次群系统一般采用 70MHz 中频。

三次群以上的系统使用 140MHz 的中频频率。

基群及子群可使用第二中频如 10M。

四次群以上的系统一般选择高于 140MHz 的中频频率。

## 3.5 微波传播特性与微波线路设计

除了视距传播之外，地面微波传输还受到地形地物和大气等因素的影响，产生衰落。进行微波线路设计时需要考虑上述因素。

### 3.5.1 微波传播特性

#### 1、 地形地物对微波传播的影响

- 平坦地表对微波电磁波的反射（干涉损耗）

- 。平坦地表可以反射微波形成反射波。
- 。反射波与直射波按照矢量进行场强的合成，形成接收信号。
- 。接收信号场强幅度随路径差周期变化，从零到两倍最大场强。
- 。在站址选择和线路设计时，要利用地形地物阻挡反射波。
- 。接收点场强也随天线高度变化，天线并非越高越好。

- **地表障碍物对微波视距传播的影响（阻挡损耗）**
  - 。一般以刃形障碍物模型进行分析，用到惠更斯-菲涅尔原理。
  - 。当刃形障碍物的最高点靠近或超过收发之间的视距连线时，仍可以接收信号。
  - 。当刃形障碍物的最高点与收发之间的视距连线距离大于等于最小菲涅尔区半径时，  
接收信号强度等于自由空间传播场强。
  - 。最小菲涅耳区表示电磁波传播所需的最小空间通道。
  - 。在站址选择和线路设计时，要研究地形剖面，根据传播余隙确定收发天线高度。

## 2、 大气对微波传播的影响

- 微波通信中，电磁波主要在对流层传输。
- 对流层对微波的影响：
  - 氧气和水蒸气分子对电磁波的吸收（对 10G 以下信号影响不明显）；
  - 雨、雾、雪等气象微粒对电磁波的吸收和散射（对 10G 以下信号影响不明显）；
  - 对流层机构的不均匀性对电磁波的折射。
- 由于不同高度压力、温度、湿度不同，折射率也不同，使微波传输沿曲线进行。

## 3.5.2 分集接收

衰落影响通信可靠性。

增加接收电平余量不总是能够解决问题。

分集接收是一个较好的办法。

分集接收——设法取得衰落特性不同的多个信号，按照一定方式合并。

常用分集方式：

### 1、频率分集：

发端将一个信号利用两个间隔较大的发信频率同时发射，接收端同时接收这两个射频信号后合并检测。

不同频率电磁波相关性很小，衰落概率也不同。

抗频率选择性衰落也比较有效。

缺点是频谱利用率低。

### 2、空间分集：

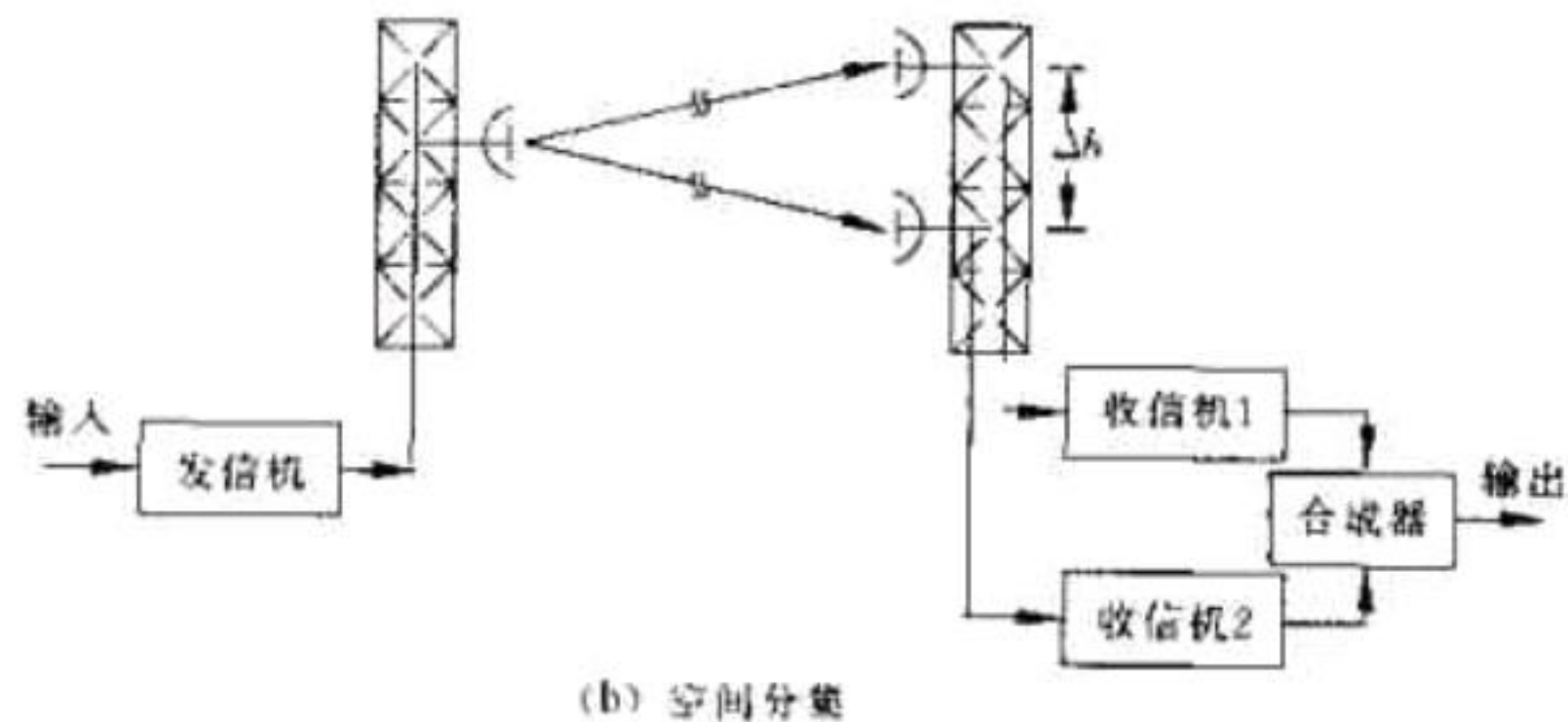
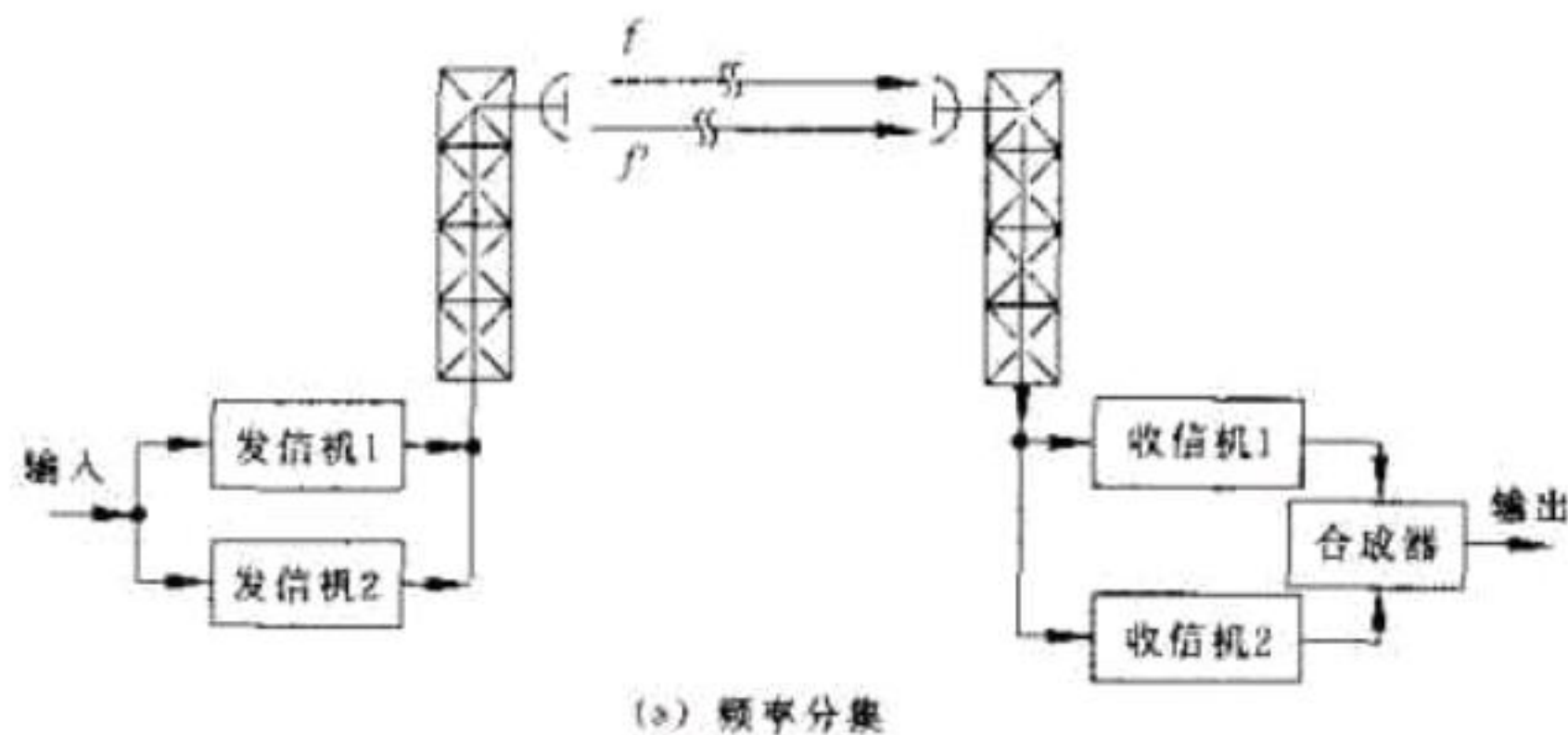


接收端利用两副空间位置相距足够远的天线，同时接收同一个发射天线发出的信号，合并后检测。

空间分集需要增加收信机，但其频谱利用率高。

### 3、混合分集：

是频率分集和空间分集的结合方案。



## 合并方法

### 1、优选开关法:

采用信噪比最高或误码率最低的准则, 从两路信号中选择一路。

两路信号信噪比相差较大时, 比较有利。

### 2、线性合成法:

将两路信号经相位校正后进行线性合并。

当两路信号信噪比相差不大时, 比较有利。

### 3、非线性合成法:

是前两种方法的有机结合。

即两路信号衰落都不严重时, 采用线性合成; 当某路信号发生深衰落时, 使用优选开关法。

### 3.5.3 微波线路设计

在设计微波线路时，除了要考虑传播损耗，还要考虑线路干扰。

干扰来源：

系统外部干扰；

系统外部干扰；

线路路由或站址选择不当。

#### 1、 线路的干扰

##### (1) 系统内部干扰：

微波中继通信系统一般采用二频制方案进行单波道频率配置，且收发天线共用。

以下讨论以此为基础。

越站干扰：

参见下页图，A 站发射信号越过 B、C 被 D 站接收。

属于同频干扰。

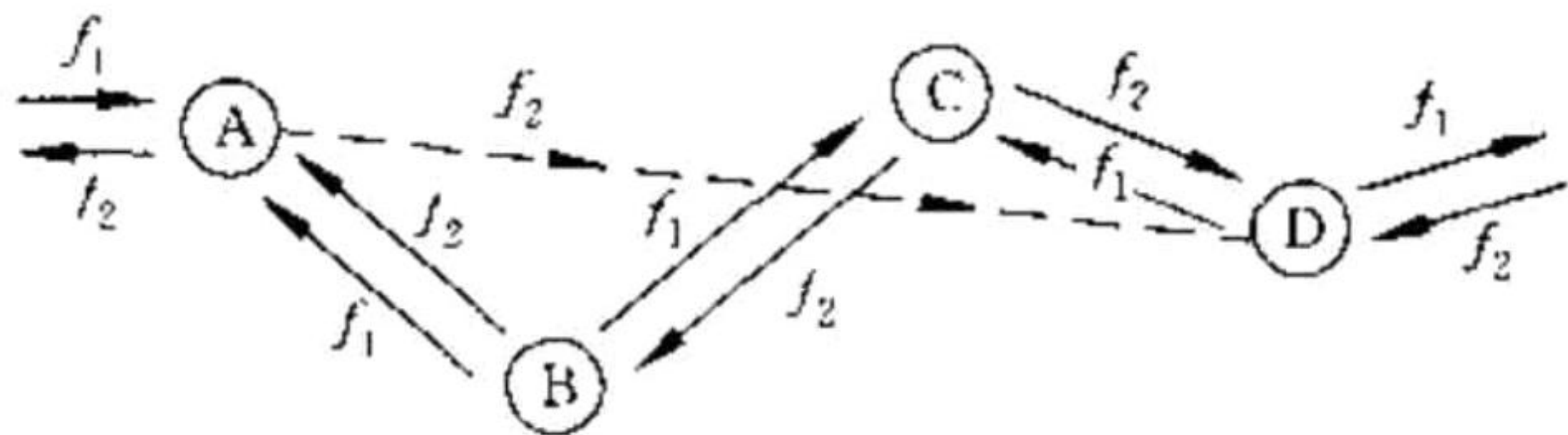


图 3-21 越站干扰示意图

越站干扰的解决方法:

将线路走向相互错开一定角度(一般不小于 15 度), 避免天线主瓣方向与相邻  
各站线路走向一致。

通常选用之字形路由。

### 旁瓣干扰

微波天线方向图中除主瓣外, 还有若干旁瓣。

旁瓣发射和接收信号也可以造成干扰。  
在微波线路的分支和拐弯处容易发生。  
属于同频邻站干扰。

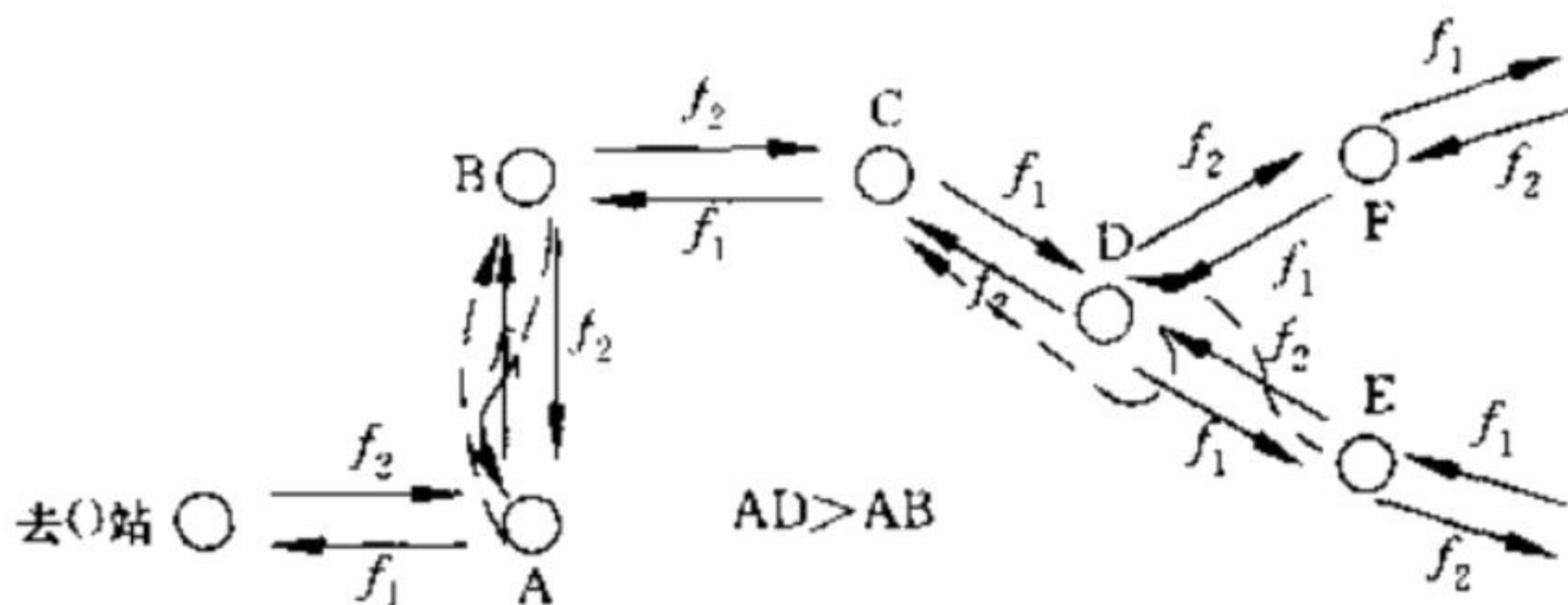


图 3-22 微波线路拐弯和分支处的旁瓣干扰

旁瓣干扰解决方法:

调整相邻各站天线指向的相对角度。

要求线路拐弯和分支出的角度尽量不小于 90 度。

必须小于 90 度时可采用正交极化配置来补偿。但夹角也不宜小于 70 度。

在线路分支处，可以通过采用不同频率配置使夹角限制条件放宽。

## (2) 系统外部干扰:

其他无线电设备、工业设备

## 2、 线路路由和站址的选择

### 需要确知的条件:

- 线路或被连接的终端的位置，沿线城市或单位。
- 沿线附近原有通信线路站址及其频段、天线方向图等。它们涉及到线路之间或站间相互干扰的问题。
- 沿线附近卫星地面站的位置、同步卫星轨道指向和工作频率，有关飞机场、雷达站等设施的位置、工作频率和通讯设施。它们涉及到与线路相互干扰的问题。
- 沿线的地形、地物、气候等情况。它们对电磁波传播和接收信号的衰落特性有影响。

### 选择站址和路由的方法:

根据以上条件在地图上进行图上作业, 逐段确定路由和站址。

### 站址和路由的选择原则:

从长远规划出发, 近期需求和长远需求相结合;

充分利用有利地理条件, 站距不宜过大, 各中继段长度相差也不宜过大。