

第二章 短波通信与超短波通信系统

本章要点:

- 短波 / 超短波传输特性
- 短波、超短波通信的调制方式
- 短波、超短波通信关键技术
- 高频自适应
- 扩展频谱通信

2.1 概述

● 短波通信

利用波长为 100m —— 10m (频率为 3MHz —— 30MHz) 的电磁波进行的无线电通信。

也称为高频 (HF) 无线电通信。

现有许多短波通信设备, 波段范围往往扩展到 $1.5\text{--}30\text{M}$ 。

用途: 广泛用于政府、军事、外交、气象、通信导航、商业等部门, 用以传递语言、文字、图像、数据等信息。

● 超短波通信

利用波长为 10m —— 1m (频率为 30MHz —— 300MHz) 的电磁波进行的无线电通信。

用途: 多用于电视、雷达、移动电台通信。

在军事通信中, 常用超短波设备来保障短距离、连队指挥或机动指挥的移动战术通信任务。

2. 1. 1 短波与超短波传输特性

● 短波、超短波的传播形式

■ 地波传播形式

- 。利用地波传播形式的频率范围大约是 1.5MHz——5MHz。
- 。为了适应地被传播，通常采用各种形式的辐射垂直极化波的垂直天线。
- 。地波的衰减随频率升高而增大，不宜用作无线电广播或远距离通信。
- 。传播距离还相与播路径上媒介的电参数密切相关。

沿海面传播的距离远远超过沿陆地的传播距离。

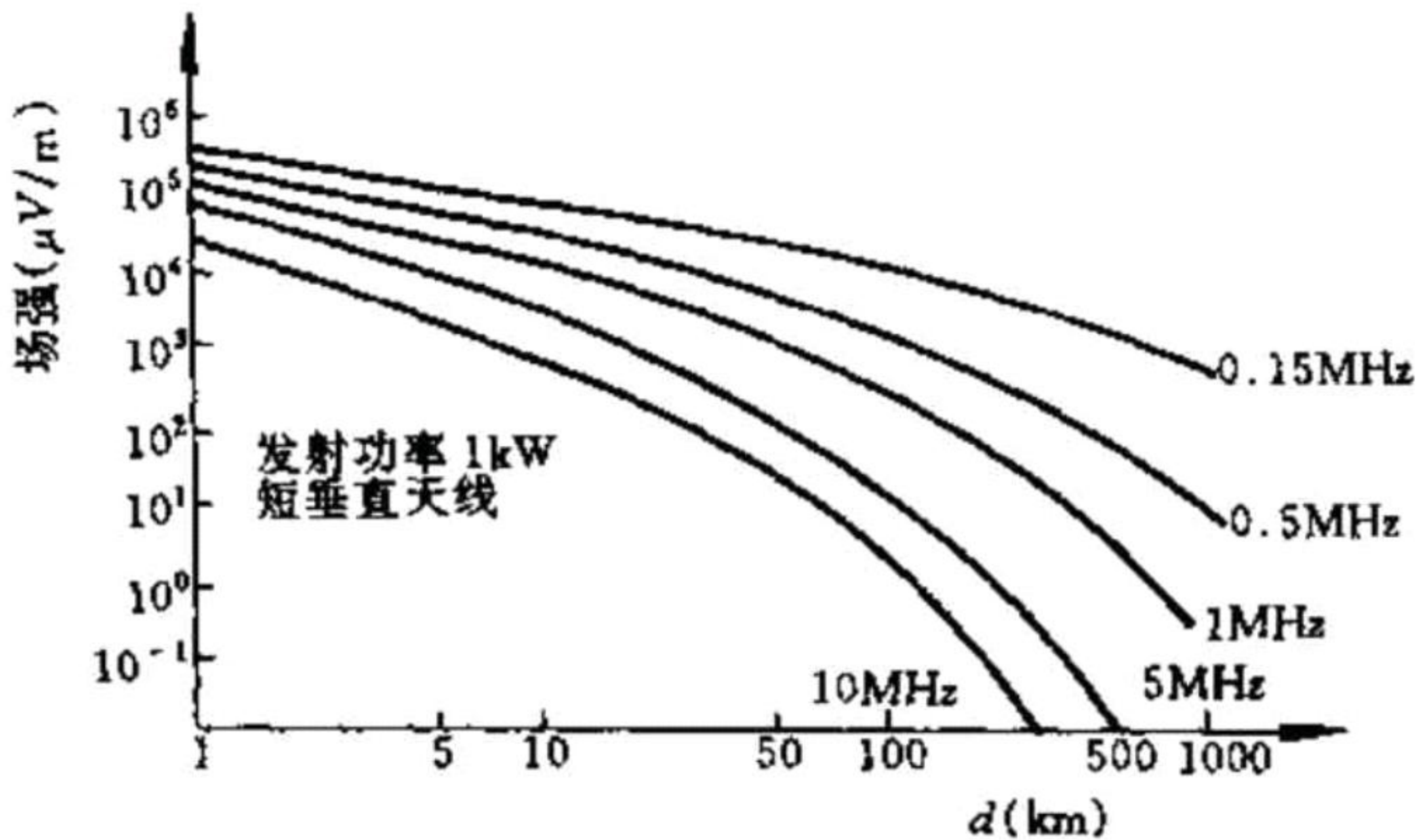


图 2-1 地波传播时,不同频率的场强-距离曲线

即使使用 1000W 的发射机,陆上传播距离也仅为 100km 左右。

■ 天波传播形式

主要靠电离层反射进行电波传输。

对于短波通信线路，天波传播比地波传播更有意义：

- 1) 可进行远距离传播；
- 2) 可超越丘陵地带；
- 3) 可在地波传播无效的很短的距离内建立无线电通信线路。

电离层的概念：

电离层由围绕地球的处于不同高度的 4 个导电层组成的，这 4 个导电层分别称为

D 层、E 层、F₁ 层和 F₂ 层

1) D 层

- 。是最低层，出现在地球上空 60km——90km 高度处。
- 。出现在太阳升起时，消失在太阳落下后，夜间不再对短波通信产生影响。
- 。电子密度不足以反射短波，短波以天波传播时将穿过 D 层。

- 。穿过 D 层时, 电波将遭受严重衰减, 频率越低、衰减越大。
- 。D 层中的衰减量远大于 E 层、F 层中的, 所以也称为吸收层。

在白天, D 层决定了短波传播的距离, 以及为获得良好的传输所必需的发射机功率和天线增益。

2) E 层

- 。出现在地球上空 100km——120km 处。
- 。出现在太阳升起时, 在中午电离达最大值, 之后逐渐减小。

太阳降落后, E 层实际上对短波传播不起作用。

- 。可反射高于 1.5MHz 的电波。

3) Es 层

- 。偶尔发生在地球上空 120 km 高度处的电离层。也称偶发 E 层。
- 。能将高于短波波段的频率反射回来。
- 。具有偶发性, 可能出现通信中断, 需谨慎使用。

4) F 层

又称反射层，对短波传播是最重要的。

和其他导电层相比，它具有最高的高度，因而允许传播最远的距离。

远距离短波通信都选用 F 层作为反射层。

电离层特征：

随昼夜、季节、天气变化，需要根据情况调整发射频率。

超短波传输：

- 。主要使用直线视距传播方式。
- 。以空间波(直射波、反射波)为传播方式。
- 。受地球表面曲率的影响，传播距离受到限制。
- 。具有一定的绕射能力。

在使用过程中，超短波通信设备应尽量避免避开高山、高大建筑物等，以确保通信效果。

● 短波电离层传播的基本特性

(1) 最高可用频率 (MUF):

指实际通信中，能被电离层反射回地面的电波的最高频率。

若选用的工作频率超过它，则电波穿出电离层，不再返回地面。

$$f_{ob} = f_c \sec \phi = \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h'} \right)^2}$$

f_c : 电波垂直投射时的最高反射频率，也称临界频率

ϕ : 电波斜射至电离层的入射角:

d : 通信线路的长度;

h' : 电波反射点处电离层的虚高。

结论:

- ◆ MUF 是指给定通信距离下的最高可用频率。

凡影响电离密度的因素都将影响 MUF 的值。

- ◆ 当通信线路选用 MUF 作为工作频率时, 只有一条传播路径, 可最佳接收。

当频率低于 MUF 时, 会存在 2 条以上传播路径, 引起时间弥散。

- ◆ MUF 是电波能返回地面和穿出电离层的临界层的临界值。

考虑电离层的结构随时间而变化, 为保证获得长期稳定的接收, 在确定线路的工作频率时, 不是取预报的 MUF 值, 而是取 $FOT=0.85MUF$ 作为最佳工作频率。

但接收点场强将较使用 MUF 时有 10-20dB 的损失。

- ◆ 实际通信线路不需频繁地改变工作频率, 一般情况下, 白天选用 1 个较高的频率、夜间选用 1—2 个较低频率即可。

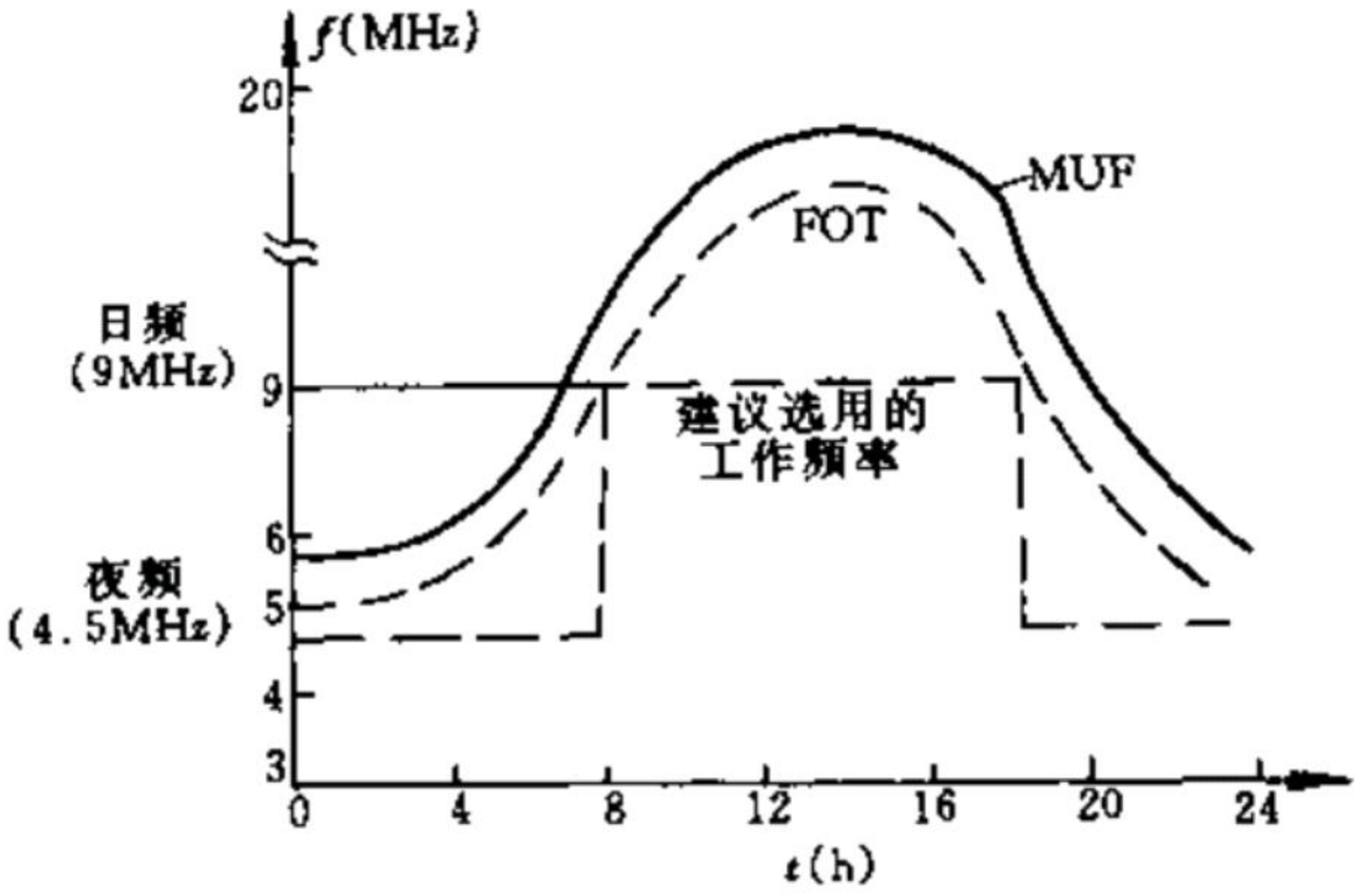


图 2-4 MUF 随时间的变化曲线

可能传播路径示意图

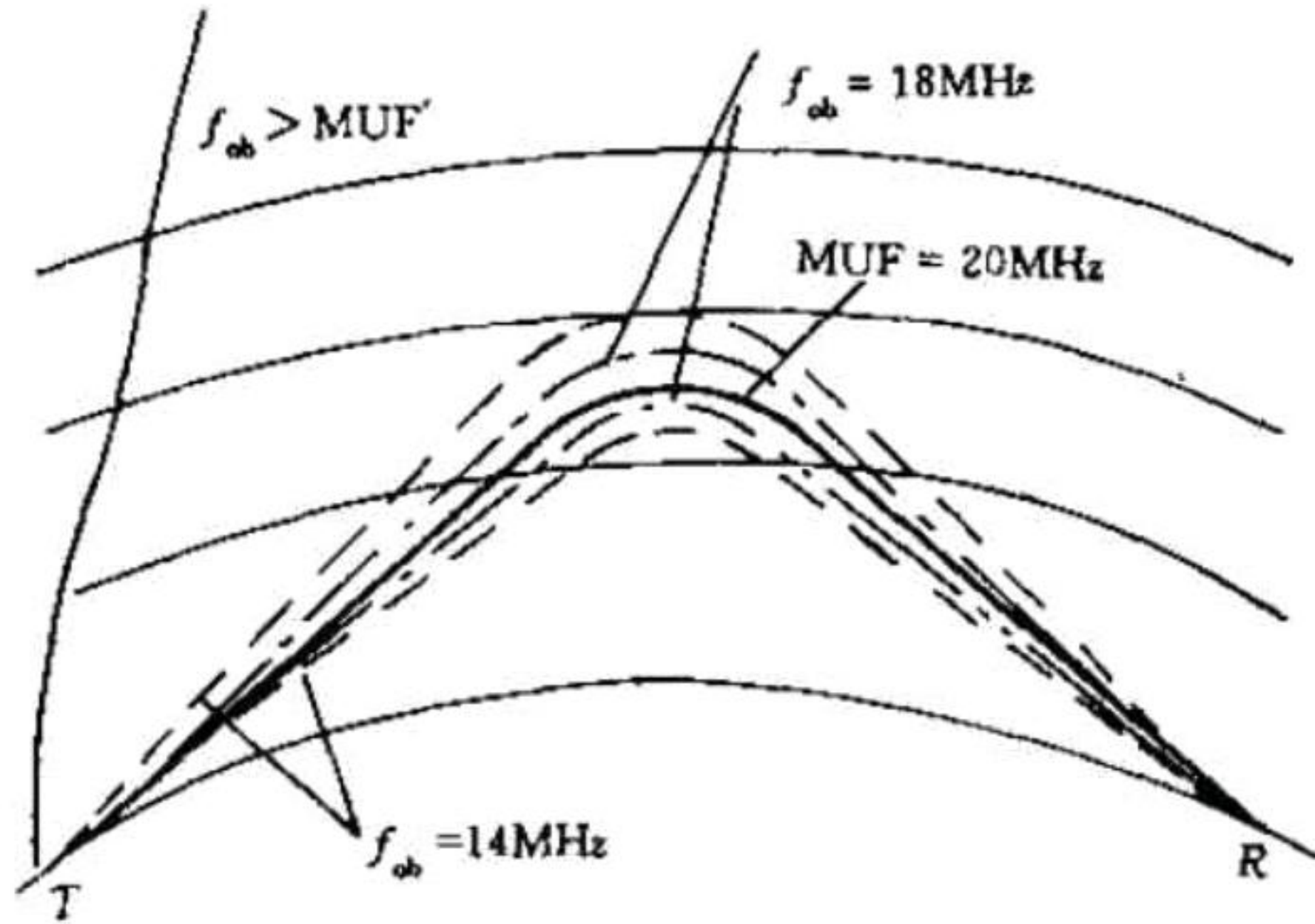


图 2-5 在某 距离为 2000km 的通信线路上可能存在的传播路径示意图

频率高于 MUF，电波穿出电离层；

频率等于 MUF，仅存在一条传播路径；

频率小于 MUF，存在两条传播路径。

(2) 传输模式 (不同模式跳数不同, 如 1 跳、2 跳等)

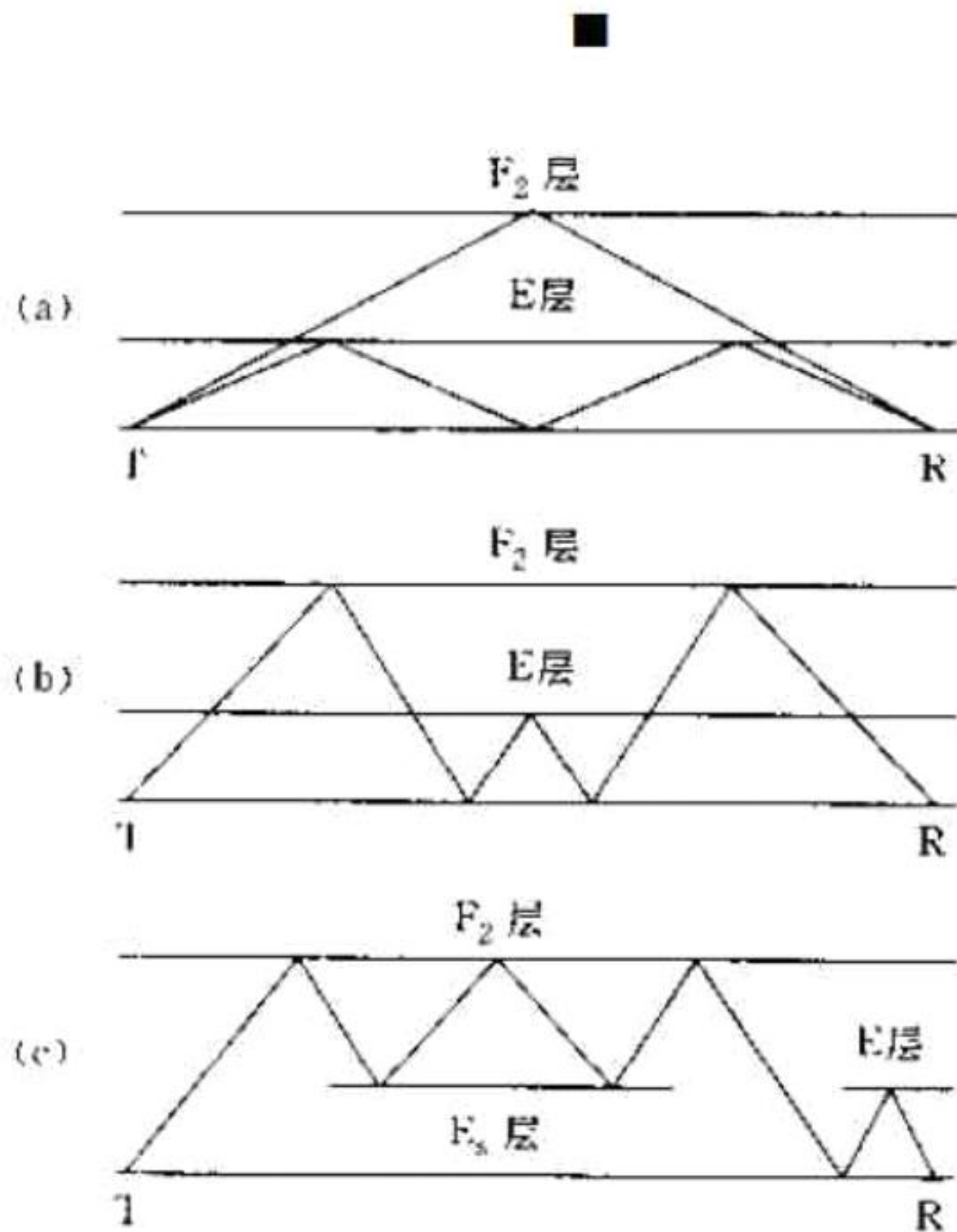


图 2 7 短波线路 1 可能出现的传播模式

(3) 多径传播:

通过若干条路径或者多个传输模式到达接收端的传播时间不同, 导致数据符号时间上弥散.

这是产生符号间干扰的重要因素。

严重的符号间干扰导致传输可靠性大大下降。

表 2-1 不同码元长度允许的最大延时差

电报速率(波特)	码元长度	允许的最大延时差(ms)
50	20	2
100	10	1
200	5	0.5

表 2-2 路径长度 3770km 时的延时和延时差

模 式	路径延时(ms)	延时差(μ s)
1E		
2E	12.73	— — — — — 90
3E	12.82	— — — — — 110
1E	12.93	— — — — — 30
1F	12.96	— — — — — 100
N	13.06	— — — — — 350
M	13.41	— — — — — 40
2F	13.45	— — — — — 200
2FE	13.65	— — — — — 300
1FM	13.95	— — — — — 230
3F	14.18	— — — — — 620
2FM	14.8	— — — — — 330
4F	15.13	— — — — — 1130
5F	16.26	

短波信道多径延时的特征

◆ 多径延时随着工作频率偏离 MUF 的增大而增大

MUF 是实时变化的。实时预报频率是非常重要的。

◆ 多径延时和通信距离有关

由于不同距离上传播模式的不同。

在 200-300 公里的短波线路上，存在多次反射，多径时延最严重，达 8ms。

在 2000-8000 公里的线路上，可能存在的传输模式减少，多径时延只有 2-3ms。

距离进一步增大，不存在单跳模式，时延又随之增大。

(参加图 2-10)

◆ 多径延时随时间变化

由于电子密度随时间变化。

(4) 衰落

指接收端信号振幅忽大忽小的随机变化。

分为快衰落（持续时间几分之一秒）和慢衰落（持续时间 1 小时或更长）。

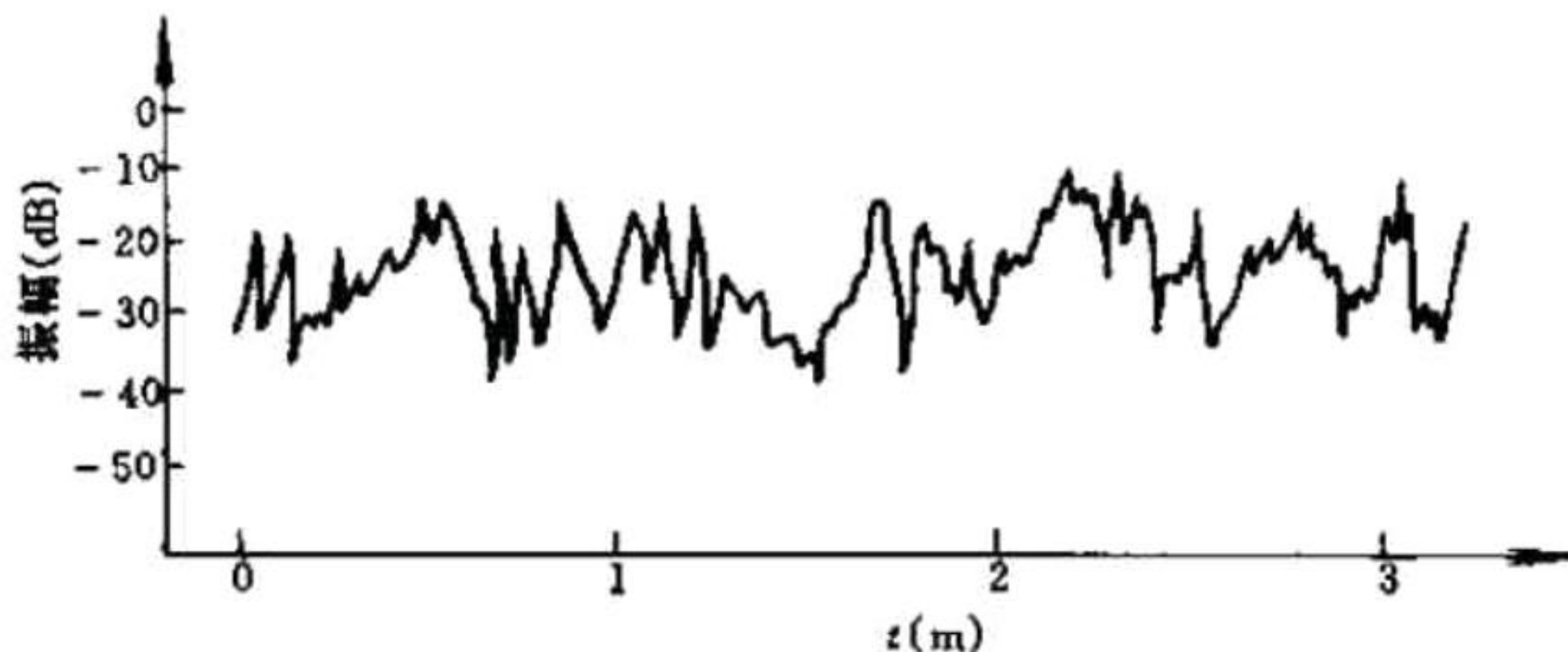


图 2-11 接收端信号振幅的随机起伏

衰落的种类:

根据衰落产生原因, 分三种:

- ◆ 干涉衰落: 不同路径信号的随机相位差导致信号起伏。

干涉衰落特点:

- 。具有明显的频率选择性;
- 。衰落信号的振幅服从瑞利分布;
- 。衰落速率越 10-20 次/分, 持续时间 4-20ms, 衰落深度 40dB (偶尔达 80dB)

◆ 吸收衰落: 电离层 D 层的吸收强度随时间变化导致信号起伏 (属慢衰落)。

吸收衰落特点:

- 。缓慢变化, 几分钟到几小时。
- 。对整个短波频段影响相同。

电离层骚扰也可以归到吸收衰落。

持续衰落时间的长短可用于判别是吸收衰落还是干涉衰落。

◆ 极化衰落: 地磁作用导致接收信号极化方向发生随机变化。

极化衰落出现概率远较干涉衰落小, 占全部衰落的 10%-15%。

(5) 多普勒频移（相位起伏）：

电离层高度实际变化、磁暴现象导致接收信号频率偏离，差生多普勒效应。是影响接收可靠性的重要因素。

2.1.2 无线电干扰

无线电干扰分类:

- (1) 外部干扰——接收天线从外部接收的各种噪声，如大气干扰、人为噪声、宇宙噪声等。
- (2) 内部干扰——接收设备本身产生的干扰。
一般只讨论外部干扰。

大气噪声:

主要是天电干扰。特征:

- 。大气放电产生，频谱很宽，对长波干扰最强，对超短波影响极小。
- 。受干扰程度随是否接近雷电中心而异。
- 。与接收地点产生的场强强度和电波的传播条件有关。

- 。在整个电磁波频谱上变化相当大，但在窄带内有和白噪声相同的频谱。
- 。具有方向性。
- 。具有日变化和季节变化。

人为噪声：

也称工业干扰，由电器设备和电力网产生。

电台干扰：

工作频率相近的其他无线电台产生，包括有意干扰。

抗干扰措施：

- ◆ 实时选频，躲开了严扰
- ◆ 尽可能提高系统的品质因数，压缩接收机的通频带
- ◆ 采用定向天线，或自适应调零天线
- ◆ 采用抗干扰能力强的调制方式

◆ 采用“跳频”或“突发传输”技术

上述后四个方面也是超短波通信中抗电台干扰的主要措施。

2.1.3 短波与超短波通信的特点

1、短波通信特点

- 。依靠天波传播；
- 。存在多种衰落和多种时延，接收信号存在随机性和不稳定性；
- 。背景噪声大，信噪比低，工作频率的选择重要；
- 。不宜传输高速数据， $<2.4\text{k}$ ；
- 。在通信设备中采用多种新技术以达到最佳抗干扰性能。

2、超短波通信

- 。受地形、地物、环境干扰等因素影响；
- 。视距传播，应用于移动通信；
- 。存在瑞利衰落、阴影衰落、多普勒频移，信号极不稳定；

- 。与短波通信相比，信号质量好，带宽大，利于综合业务信息的传输；
- 。采用中速或高速调频技术以抗干扰和保密。

2. 2 现代短波与超短波通信技术

2. 2. 1 常用调制、解调技术

常用调制技术

表 2-3 常见的调制方式及用途

调制方式		用途	
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		抑制载波双边带调幅 DSB	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信, 无线电台, 数传
		残留边带调幅 VSB	电视广播, 数传, 传真
	非线性调制	频率调制 FM	微波中继, 卫星通信, 广播
		相位调制 PM	中间调制方式
	数字调制	幅度键控 ASK	数据传输
		频率键控 FSK	数据传输
		相位键控 PSK, DPSK, QPSK 等	数据传输, 数字微波, 空间通信
		其他高效数字调制 QAM, MSK 等	(提高频带利用率) 数字微波, 空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式, 遥测
		脉宽调制 PDM(PWM)	中间调制方式
		脉位调制 PPM	遥测, 光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话, 卫星, 空间通信
		增量调制 DM, CVSD, DVSD 等	军用, 民用电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话, 图像编码
		其他语音编码方式 ADPCM, APC, LPC 等	中, 低速数字电话

短波通信常用：AM、SSB、FM、ASK、FSK、PSK。

超短波通信常用：FM、PM、ASK、FSK、PSK。

振幅调制 AM 及解调(检波)

- 振幅调制中，输出已调信号的包络与输入调制信号成正比

$$S_{AM}(t) = [U_{om} + f(t)]\cos(\omega_c t + \theta_c)$$

- 从频谱图可知：

- 。AM 波占两倍的调制信号频谱的带宽；
- 。上、下边带所含的信息相同；
- 。载波不含信息，只起运载信息的作用，故 AM 波的发射载波功率浪费了；

AM 波占用频带较宽，抗干扰能力很差，因此现代通信设备只保留 AM 制，不作为主要调制制式和工作种类。

- 解调：采用包络检波，复杂度低。

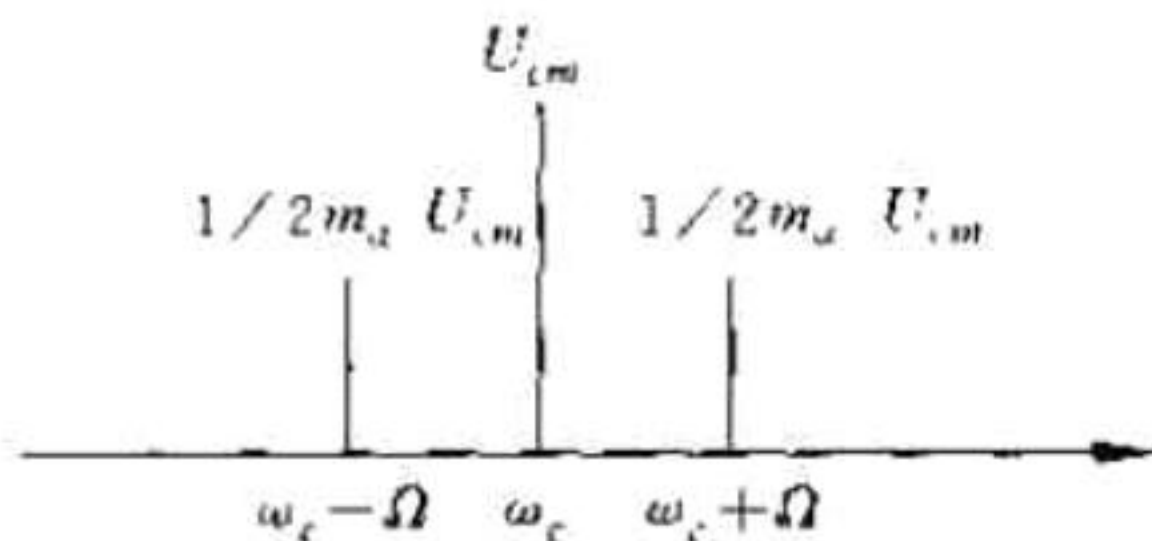


图 2-18 单音调制时的调幅波频谱

单边带调制 SSB 及解调

- 单边带 SSB 调制由双边带 DSB 调制发展而来，可以采用上边带或下边带

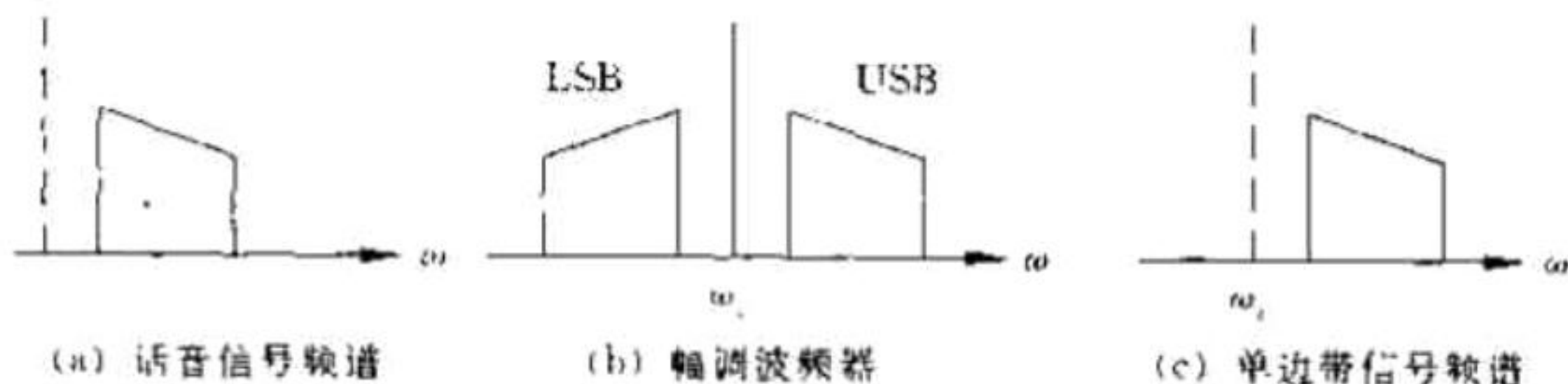


图 2 19 用滤波法产生单边带信号

- 单边带调制/解调是借助频谱搬移、滤波等手段实现的。

频率调制 FM 及解调(鉴相)

- 频率调制(FM)与相位调制(PM)统称为角度调制,属于非线性调制。
- 频率调制——使高频振荡的频率按调制信号的规律变化,振幅保持不变。
- 相位调制——使高频振荡的相位按调制信号的规律变化,振幅保持不变。
- 调频信号的产生方法:直接调频法与间接调频法。
- 调频波解调的方法:直接法,锁相环解调,脉冲计数法,正交鉴频。
- 与 AM 调制相比、角度调制的能量利用率高,因其平均功率与最大功率相同,是恒幅的,可以利用限幅器去掉寄生调幅,故调频制的抗干扰性能好。

2.2.2 数据传输的相关技术

短波信道对数据传输的影响

- 多径效应引起的衰落。

使信号幅度减小，甚至完全消失。是造成短波数据产生突发错误的主要原因。

- 多径效应引起的波形展宽。

使码元间产生串扰，是限制数据速率的主要因素。

- 电离层快速运动及反射层高度变化引起的多普勒频移。

使发射信号的频率结构发生变化，相位起伏不定，造成数据符号的错误接收。

在短波数据传输系统中抗多径和抗衰落的主要措施

- 高频自适应技术

包括频率自适应、速率自适应、功率自适应、自适应均衡等。

- 抗衰落性良好的调制键控技术

如时频调制技术。

- 分集接收技术

时间分集、频率分集、空间分集、极化分集等。

- 差错控制技术

检错/纠错编码、ARQ 技术。

时频组合调制 FTSK

- 实际上是一种组合调制，由时移键控(TSK)和频移键控(FSK)组合而成。

如图，先将码元“0”、“1”进行 TSK 键控调制，再用高、低电平控制两个频率振荡器产生频移键控 FSK。

- FTSK 的优点：可以有效提高传输可靠性，在短波信道中性能优于 FSK。

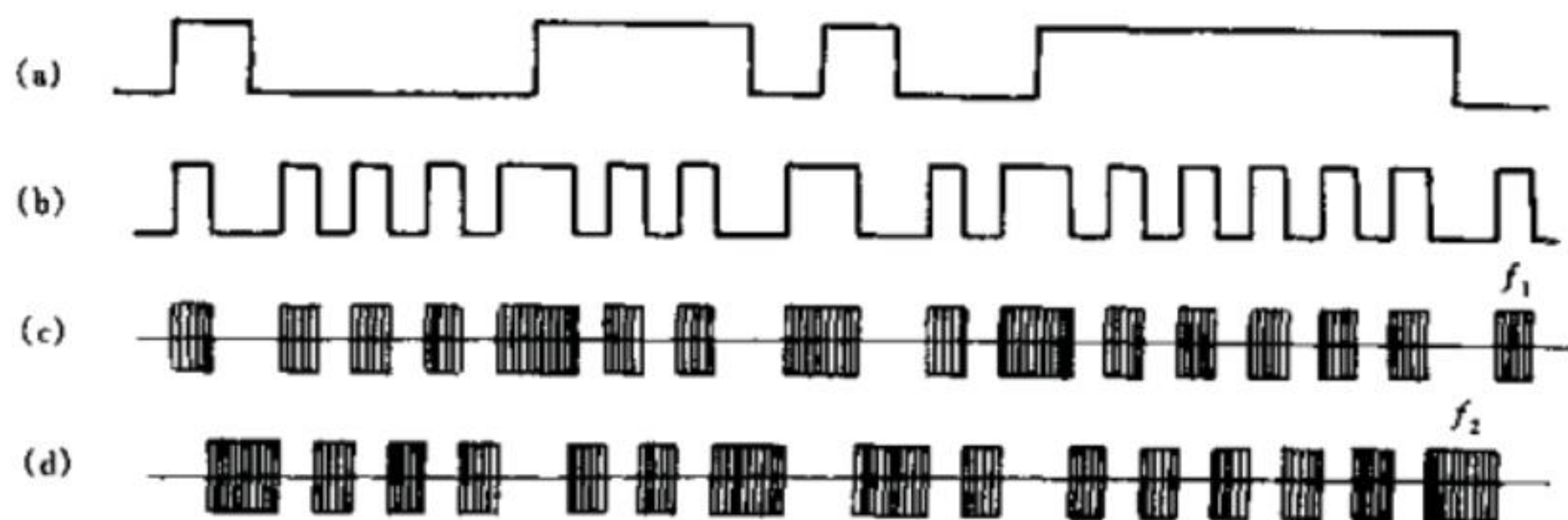


图 2-21 FFSK 波形产生原理

分集接收技术

是抗衰落、多径的有效措施

■ 采用分集技术的必要性:

多径效应引起的快衰落范围高达 30dB 以上, 深衰落时, 接收信噪比极低, 导致很高的符号错误概率, 甚至链路中断。

采用分集技术可有效提高接收信噪比, 降低符号错误概率和链路中断概率。

■ 分集接收的概念:

接收端消息的恢复是在多重接收的基础上,对接收到的多个信号副本进行适当组合或选择,从而达到提高通信质量的技术。

分集接收技术包括两个方面的内容:

1) 信号的分散传输。

接收端能获得多个独立衰落的信号样品,是分集接收克服快衰落,达到可靠通信的依据。

把同一信号在空间、频率、时间、角度和极化等方面分离得足够远,衰落可以认为是相互独立的。

2) 信号合并。

指接收端收到多个独立衰落的信号后如何合并的问题。

■ 分集方式:

即指信号分散传输的方式，包括：空间分集、时间分集、极化分集、频率分集和角度分集等。

在短波传输中常用的是前三种分集以及它们的组合。

时频调制也可看作分集的一种入式。

■ 合并方式：

分集接收效果的好坏，除与分集方式、分集重数有关外，也与接收端采用的合并方式有关。

◆ 接收到的各路信号分别为 $f_1(t)$ ， $f_2(t)$ ， \dots ， $f_n(t)$ 。则合并后的信号为

$$f(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(t)$$

◆ 合并方式：即加权因子 α_i 的选择方式。

➤ 选择式合并：信噪比最高的一路信号加权因子不为零，其余全为零。即

$$f(t) = \alpha_i f_i(t), \alpha_i \neq 0$$

- 等增益合并：各路信号采用相同的加权因子 α ，即

$$f(t) = \alpha \sum_{i=1}^n f_i(t)$$

- 最大比合并：各路信号的加权因子与信噪比成正比。
 - 性能：最大比合并 \rightarrow 等增益合并 \rightarrow 选择式合并
 - 复杂度：选择式合并 \rightarrow 等增益合并 \rightarrow 最大比合并
- ◆ 短波通信中一般选择复杂度较低的选择式合并、等增益合并或二者的组合。

差错控制技术

- 在短波通信线路上采用差错控制的必要性
- 短波通信线路中差错的特点
 - 随机差错、突发差错和混合差错

- 差错控制方式：

- ◆ **反馈纠错 ARQ** — 即根据线路接收端要求而自动重发，简称 ARQ。
 - 仅需一定的错误监督能力，编码效率高
 - 设备实现复杂度低、成本低
 - 需要反馈信道，适合于对等通信，不适合于广播通信应用
- ◆ **前向纠错 FEC** - 不需要反馈，发端采用信道编码技术提供一定的纠错能力，接收端可以通过解码处理纠正传输过程中的错误。
 - 常用 FEC 编码：时间交织、卷积码、RS 码、线性分组码等
- ◆ **混合纠错**：ARQ 与 FEC 的结合应用
- **高速数据传输技术体制**
 - ◆ **并行传输体制**：把高速串行信道分裂成许多低速的并行信道，有效地降低多径效应引起的符号间干扰，提高传输可靠性。

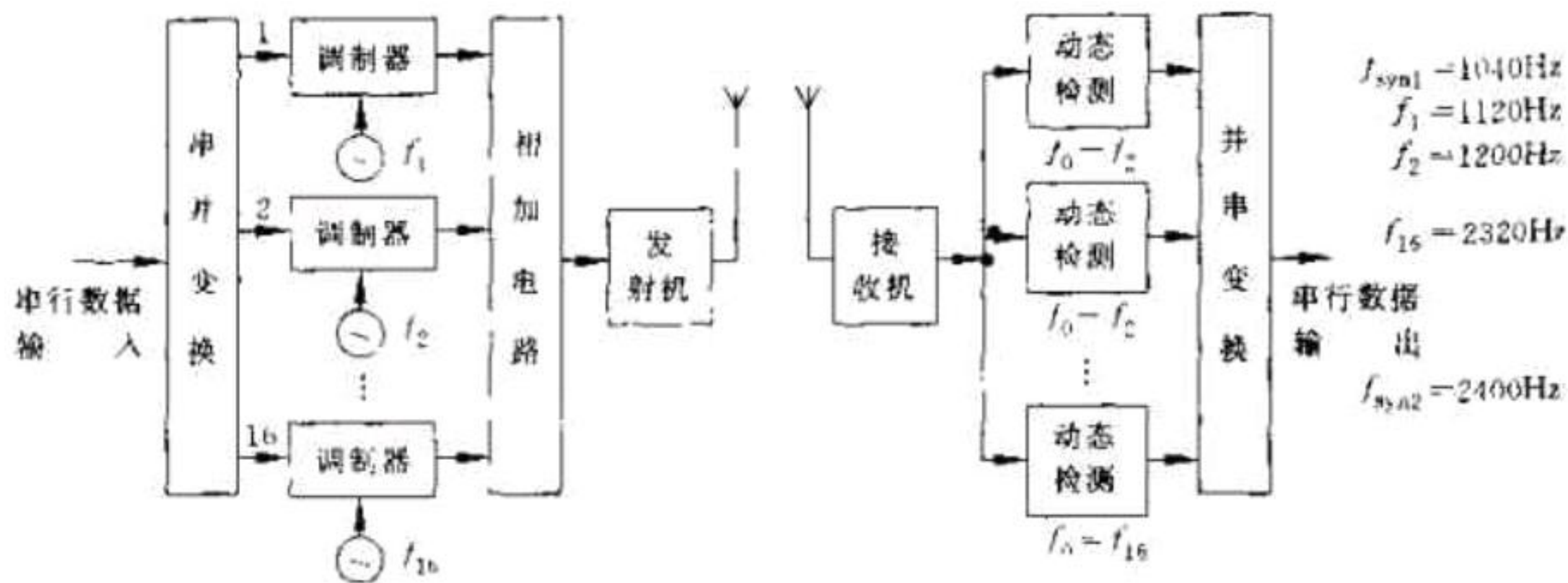


图 2-23 并行系统

- ◆ **串行传输体制**: 利用单载波调制技术进行高速数据传输, 采用高效的自适应均衡、序列检测和信道估计技术, 从而有效地抵制多径效应引起的码间串扰。

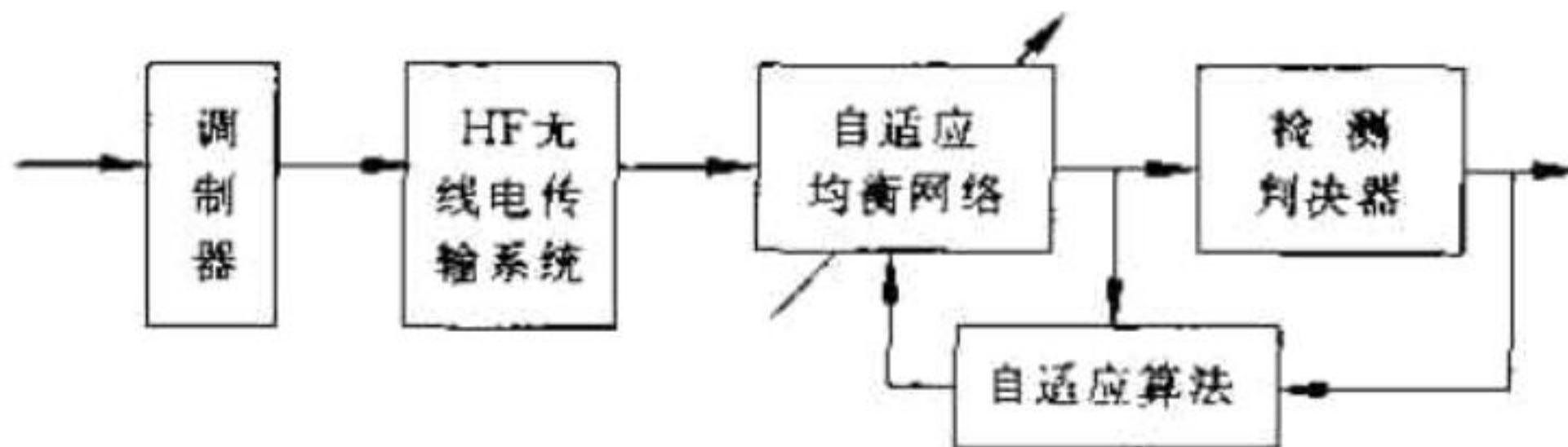


图 2-24 以自适应均衡器为主体的高速 HF 调制器的示意方框图

2.2.3 自适应通信技术

2.2.3.1 自适应通信基本概念

1 短波天波通信的频率预测

短波电离层反射信道特点:

路径损耗、时延散布、噪声和干扰等都随频率、地点、季节、昼夜而不断变化。

频率预测的必要性:

频率不能任意选择,需要在通信前进行预测。太高穿出电离层,太低则被电离层全部吸收。

2 短波通信中采用高频自适应的必要性

短波信道特性是时变的,但前面介绍的频率预报方法是长期预报。

长期预报结果的不足:

- (1) 长期预报和观测在一天内有很大的差异
- (2) 长期预报提供的最佳工作频率实际上起不到最佳的效果
- (3) 长期预报没有考虑多径效应的影响
- (4) 长期预报没有考虑随时间变化的因素

因此，高频自适应是必要的。

3 高频自适应通信的定义

指高频通信系统具有适应通信条件变化能力的通信系统。

通信条件：包括传播条件、大气噪声、人为干扰、被传输信息的形式等。

自适应类型：频率自适应、功率自适应、速率自适应、分集自适应、自适应均调和自适应调零天线等。

最重要的自适应：频率自适应，即自适应选频和换频。

高频自适应的基础：实时信道估计（RTCE）：

实时测量一组信道的参数，并利用得到的参数值定量描述这组信道的状态和传

输某种通信业务的能力。

4 实现频率自适应的方法

(1) 在独立的探测系统中采用 RTCE 技术，为某一高频通信线路提供频率信息。

不能实现每时每刻可高频媒介匹配。

(2) 在通信系统中直接采用 RTCE 技术。

可实现实时跟踪。

5 频率自适应的分类

(1) 根据频率自适应的功能分类

通信和探测分离的独立探测系统；

通信和探测和用的高频自适应通信系统。

(2) 根据采用的 RTCE 技术进行分类

采用“脉冲探测 RTCE”的高频自适应；

采用“CHIRP 探测 RTCE”的高频自适应；

采用“导频探测 RTCE”的高频自适应；

采用“错误计数 RTCE”的高频自适应。

采用“和传输信息共信道传输进行 RTCE”的高频自适应。

2.2.3.2 实时信道估值的定义

实时信道估值是描述“实时测量一组信道的参数并利用得到的参数值定量描述这组信道的状态和传输某种通信业务的能力”的过程。

测量信道参数是 RTCE 的重要任务；

RTCE 中实时的概念应理解为实时预报；

RTCE 的最终目的是实时描述在一组信道上传送某种通信业务的能力。

2.2.3.3 高频自适应电台的发展过程（略）

2.2.3.4 高频自适应电台的主要功能

自动信号扫描功能;

选择性呼叫功能;

线路质量分析功能 (LQA);

自动线路建立功能 (ALE);

其他功能。

2.2.4 扩展频谱技术

2.2.4.1 扩展频谱通信的基本概念和理论基础

1、扩频通信的定义

扩频通信技术是一种信息传输方式，其信号所占有的频带宽度远大于所传信息必需的最小带宽；频带的展宽通过编码及调制的方法实现，与所传信息数据无关；在接收端用相同的扩频码进行相关解调来解扩及恢复所传信息数据。

- ◆ 信号的频谱被扩展宽了
- ◆ 采用扩频码序列调制的方式展宽信号频谱
- ◆ 在接收端用相关解调来解扩

2、扩频通信的理论基础（仙农信道容量公式）

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right)$$

用增加带宽的方法可以换取信噪比的改善,是扩展频谱通信的基本思想和理论依据。

2.2.4.2 扩频通信的主要特点

■ 抗干扰性强:

扩频通信系统扩展的频谱越宽,处理增益越高,抗干扰性能越强。

■ 隐蔽性好:

扩频信号在很宽的频带上被扩展,信号的功率谱密度很低。

■ 可实现码分多址:

通过正交扩频码让许多用户共用同一频带,可提高频带利用率。

■ 抗多径干扰:

利用扩频码良好的自相关特性可以分离多径信号并进行合并处理 (Rake),从而获得多径分集增益。

■ 能精确地定时和测距

2.2.4.3 扩展频谱通信的几种方式

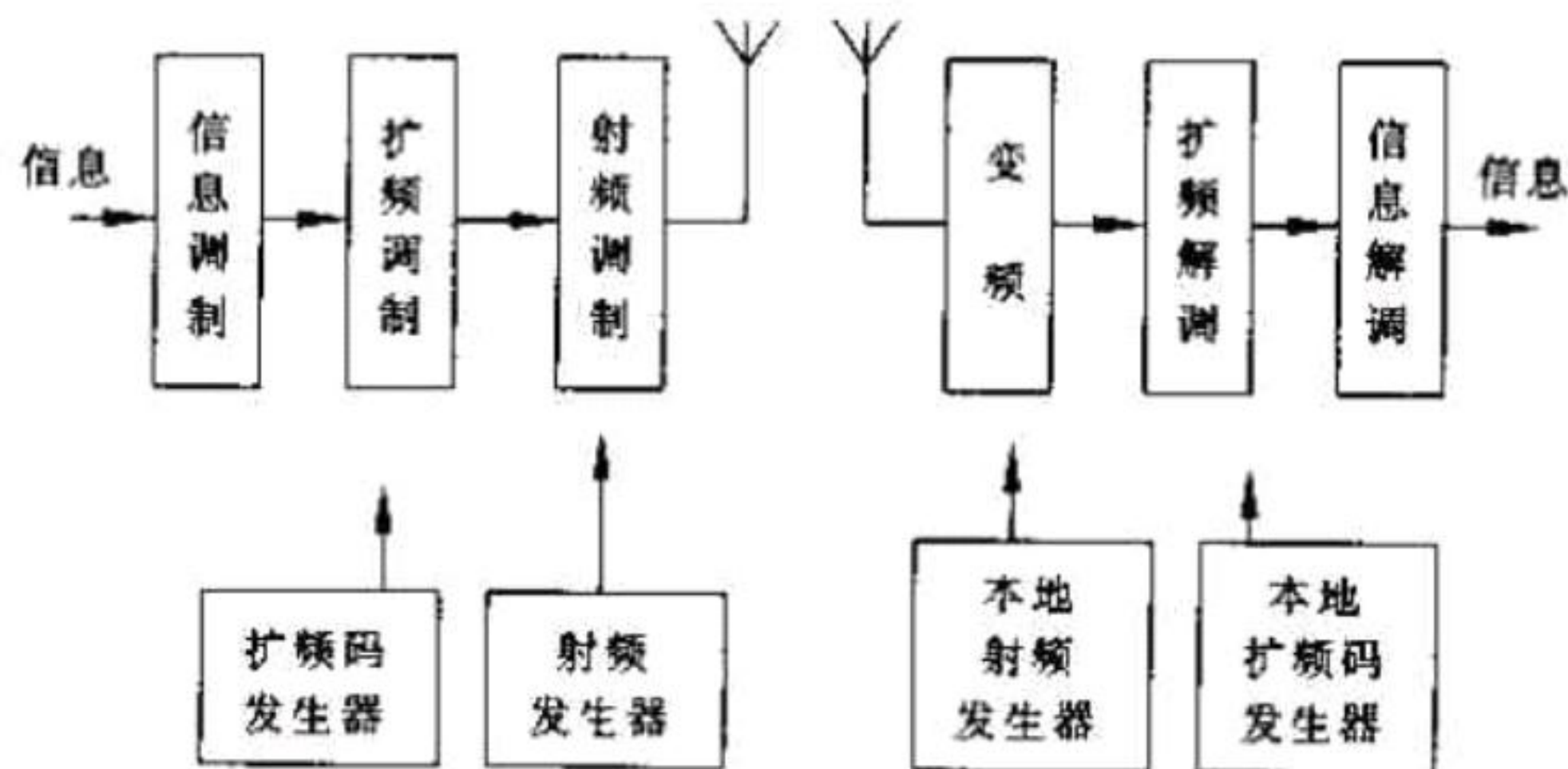


图 2-27 扩频通信的一般原理框图

- 直接序列扩频系统 (DS-SS)
- 跳频扩频系统 (FH-SS)
- 跳时扩频系统 (TH-SS)
- 混合扩频系统 (DS/FH、DS/TH、FH/TH)

(2.3-2.4 节自学)

2.5 短波、超短波通信的发展

小型化;

跳频高速化;

直扩与调频相结合;

软件无线电。