

移相器的原理及工程应用

原创 皮诺曹 射频通信链 2025年11月28日 00:00 江苏



射频通信链

让射频学习不再困难，学射频，学通信，就看射频通信链。

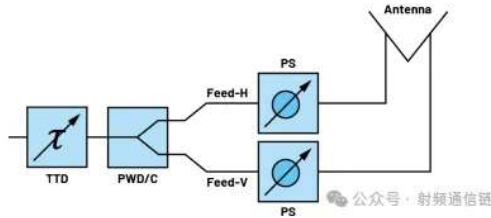
406篇原创内容

公众号

移相器的原理及工程应用

1. 引言

移相器（Phase Shifter）是一种能够改变电磁波传播相位的微波器件，在相控阵雷达、通信系统、电子对抗等设备中扮演着不可或缺的角色。随着现代电子系统向高频化、智能化方向发展，移相器技术已成为决定系统性能的关键环节。本文将从基本原理出发，深入分析各类移相器的实现机制及其工程化应用特点。



2. 基本原理与核心参数

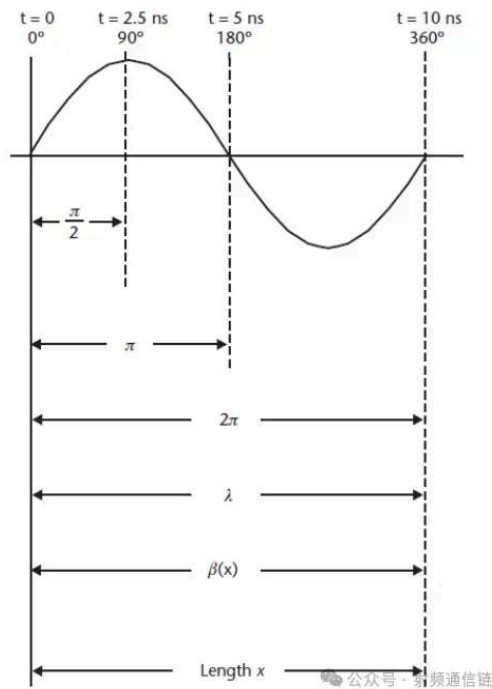
2.1 传输线理论基础

在传输线中，传播常数 γ 是一个复数，包含衰减常数 α （实部，单位Np/m）和相位常数 β （虚部，单位rad/m）。相位常数 β 描述了信号沿线传播时的相位变化率，距离发送端 x 处的电压相位偏移量为 βx 。

相移与延迟的等效关系： 360° 相移对应一个完整波长 λ ，满足基本关系式： $\lambda=2\pi/\beta$

由此可得相移量与传播延迟的换算关系：时间延迟=相移($^\circ$)/ $360\times$ 频率(Hz)

对于微带线结构，相速与延迟受线宽和介质高度影响，这是其与带状线的根本区别。



2.2 关键性能指标

工程应用中需重点关注以下参数:

频率范围与带宽: 决定适用场景

总相移范围 $\Delta\varphi$: 通常需覆盖 $0\sim360^\circ$

插入损耗: 直接影响系统噪声系数

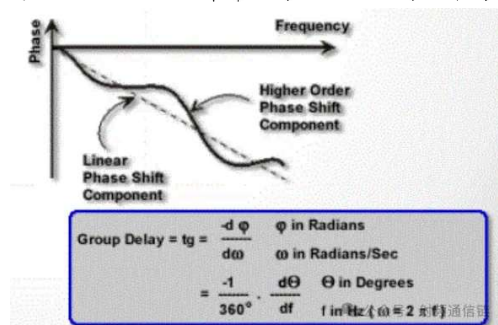
开关速度: 数字移相器的关键指标

功率容量: 尤其在大功率雷达系统中

相位精度与分辨率: 决定波束指向精度

回波损耗: 保证系统匹配特性

群延迟概念描述了窄带信号通过电路时的平均延迟, 其与相位变化率直接相关:

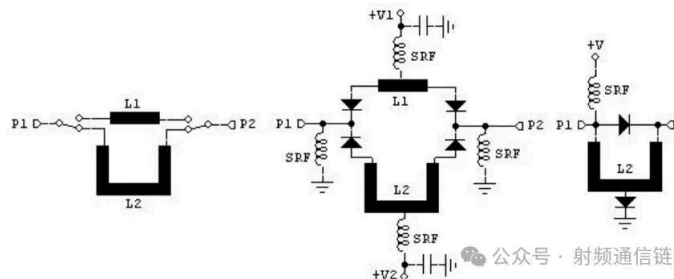


3. 技术实现原理

3.1 模拟移相器

模拟移相器通过连续可调元件实现相移量的连续变化, 具有无限分辨率的优势。

变容二极管方案: 反向偏置的变容管提供电压依赖的结电容, 作为可变电抗元件改变传输线电长度。该方案相移范围大、响应速度快, 但存在精度较低、带宽窄、功率容量小 ($<1\text{W}$) 的局限。



正交耦合反射型：基于 90° 耦合器将信号分为两路，经可变电抗负载反射后合成。当负载为纯电抗时（从短路到开路），反射系数相位连续变化，从而实现 $0-180^\circ$ 相移。通过谐振电路扩展，理论上可达 360° 范围。其突出优点是输入/输出匹配不随负载变化，天然具备阻抗隔离特性。

3.2 数字移相器：开关线型技术

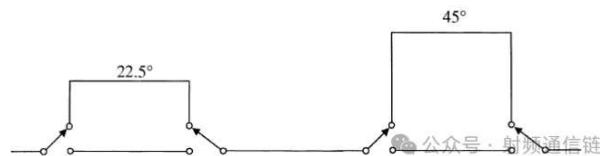
数字移相器通过离散状态切换实现二进制加权相移，是当前工程应用的主流方案。

基本工作原理：采用开关选择不同长度的传输路径，利用延迟差 ΔL 产生相移： $\Delta\phi=2\pi\cdot\Delta L/\lambda$

其中 λ 为导波波长。当路径差为 $\lambda/2$ 时可获得 180° 相移。值得注意的是，相移量具有近似线性的频率响应，适合宽带应用。

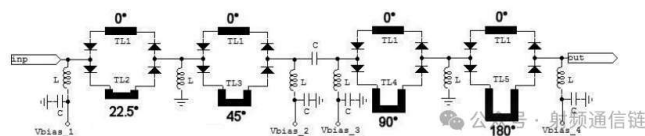
实现拓扑：

SPDT开关型：使用单刀双掷开关切换参考线与延迟线，隔离度需 $>20\text{dB}$ 以避免相位误差

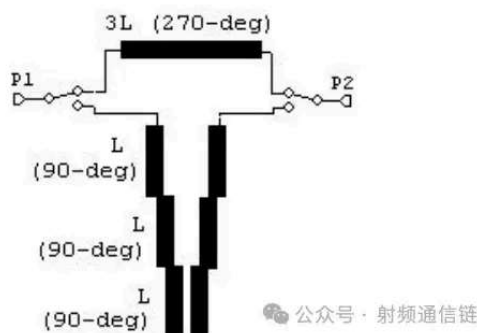


PIN二极管型：用PIN管实现开关功能，正向电阻约 1Ω ，反向电阻达 $10\text{k}\Omega$ 。采用正负偏压控制可同步实现导通路径二极管正偏、截止路径反偏，提升隔离度并

简化电源设计



Schiffman宽带结构：采用 $\lambda/4$ 耦合线与 $3\lambda/4$ 参考线的相位差，可在宽频带内获得平坦的 90° 相移。多节级联设计可进一步拓展带宽至多个倍频程。



集总元件方案：在HF-UHF频段，可用LC网络替代分布式传输线。低通-高通网络组合可实现 180° 相移，且高频段响应平坦，克服了分布参数结构的尺寸限制。

3.3 多位数字移相器

通过二进制加权级联实现全范围高精度相移：

相位状态按二进制组合，例如4位移相器可产生 0° 、 22.5° 、 45° ... 337.5° 共16个状态。位数增加可减小量化误差，但代价是复杂度提升和插入损耗增大。

延迟线优化：实际设计中，各延迟线长度并非严格递增，而是通过电磁仿真优化，在相位一致性和路径损耗间取得最佳平衡。

3.4 其他特殊结构

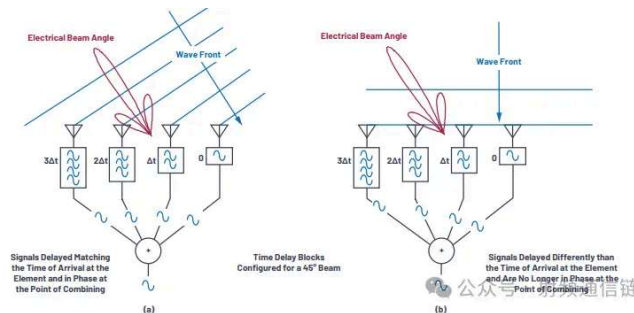
分布式移相器：沿传输线周期加载可调电抗（如变容管、MEMS电容），改变相速实现连续调相。挑战在于调谐过程中阻抗匹配的保持。

铁氧体移相器：基于磁化铁氧体的非互易特性，通过驱动电流改变偏置磁场，实现 -180° 至 $+180^\circ$ 相移。可工作于模拟模式（连续调磁）或数字锁存模式（脉冲置位），但需解决重置问题（非互易特性）。

4. 工程应用

4.1 相控阵天线系统

移相器最重要的应用是相控阵天子的电扫描波束控制。通过为每个辐射单元施加精确相位差，使合成波束指向特定方向 θ ，无需机械转动即可实现快速空域覆盖。



关键技术要求：

相位稳定性：相移不随频率变化，确保宽带信号波束指向一致性

快速切换：支持微秒级波束捷变，满足多目标跟踪需求

低插入损耗：降低阵列增益损失

高功率容量：适应雷达发射机大功率输出

波束形成网络：结合幅度加权控制，可同时实现低旁瓣、高增益或多波束成形。现代有源相控阵普遍采用T/R组件集成移相器，形成发射/接收分布式架构。

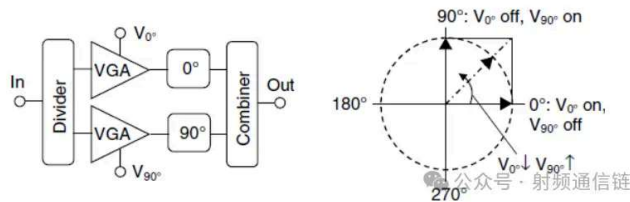
4.2 矢量调制应用

矢量调制器利用多路正交信号的幅度加权合成实现 360° 相位控制。典型结构包括：

双路正交型： 0° 与 90° 路径通过VGA调幅后合成，覆盖 90° 范围

三路 120° 型： 0° 、 120° 、 240° 路径组合，配合冷模式FET衰减器，实现完整 360° 控制

该技术在数字通信的IQ调制、自适应干扰抵消等场景中广泛应用。



4.3 其他射频系统

在功率放大器线性化中，移相器用于调节预失真环路相位；在相位鉴频器中作为核心鉴相元件；在智能天线中支持多用户MIMO空间复用。

5. 发展趋势与挑战

当前移相器技术呈现以下发展方向：

集成化：CMOS/SOI工艺实现单片集成，降低成本和尺寸

智能化：嵌入式校准算法补偿温度漂移和非线性

多功能化：与放大器、开关构成多功能T/R组件

新材料：铁电薄膜、液晶等实现低功耗调谐

主要挑战包括：如何在保证性能前提下进一步降低插损、提高功率容量，以及实现毫米波频段的低成本集成解决方案。

6. 结论

移相器作为相位控制的核心器件，其技术进步直接推动了相控阵雷达、5G通信、电子侦察等现代电子系统的发展。从基础的传输线理论到复杂的矢量调制架构，从模拟连续调谐到数字精确控制，移相器技术已形成完整的理论体系与工程实现路径。未来随着新材料、新工艺的应用，移相器将朝着更高性能、更低成本、更大规模集成的方向持续演进，为下一代电子系统的创新发展提供关键支撑。



皮诺曹

“ 射频工程师加油 ”

喜欢作者