

基于跳频技术的 FMCW 雷达 超宽带调频抗干扰方法分析

张国政

(空军工程大学, 陕西 西安 710038)

摘要 本文简要介绍了跳频、FMCW 雷达的相关理论内容, 以 FMCW 雷达为研究主体, 研究其调频信号特征, 结合信号的非线性特质, 分析可能发生的差频无序叠加现象, 初期研究时侧重于优化信号非线性特征, 给予相应的补偿处理, 并未切实增强信号对抗干扰的能力。为此, 以跳频技术为切入点, 加强信号频率调整, 增强雷达信号运行的适应性, 减少频谱无序叠加问题。经实践发现: 此方法可行, 能够切实增强雷达信号适用性, 克服干扰。

关键词 跳频技术 频段 信号

中图分类号: TN973

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)09-0010-03

FMCW 雷达是一种具有持续波、信号频段调节能力的信号, 能够进行远程探测, 排除客观条件的干扰。客观干扰条件包括: 云雾、暴风等。雷达信号进行探测时, 可 24 小时持续进行, 不会发生探测中断问题, 极具探测优势。探测结果较为精准, 使其在船舶平稳运行、工业生产检查等多个行业中被广泛应用。

1 相关理论

1.1 跳频技术

1.1.1 技术概述

跳频技术是指收发两个设备, 在特定信号频段载波中, 进行讯号传输。此时接收讯号的设备, 跳频技术会形成具有波动性的讯号, 或称为脉冲噪声。跳频技术传输的讯号, 可采取特殊设计方式, 以此消除信号传输形成的干扰。跳频传输的信号, 应达到 FCC 规范, 使用不少于 75 个跳频信号, 跳频间隔时间设定为 400ms。

跳频科技是一种使用广泛的扩频方法, 对收发两个主体的载波频率, 使用前期设定完成规律, 创建新型离散性的通信路径。通信中引入跳频科技, 伪随机动态码的引导下, 使载波频率发生动态改变。通信科技的信号传输中, 跳频科技是使用“码序列”方式, 高效完成多频通信, 具有码控跳频的信号传输特点。

1.1.2 技术优势

(1) 信号隐藏性。跳频通信形式与原有频率的信号传输方式对比时, 跳频传输更具信号隐藏功能, 不易被截获。在对方未掌握跳频规则时, 无法有效获取传输资料。(2) 信号传输平稳性。跳频通信方式表现

出较强的抗干扰优势。如果信号传输期间, 有部分频点受到干扰, 其他正常频段可完成通信。跳频通信组成中含有短时间窄带程序, 能够与各类窄带相容, 保持电台信息互通, 可提升设备科技的升级能力。

1.1.3 跳频图的形成

收发双方的通信任务, 采取事前约定方式, 拟定跳频图案进行频率跳变。此种跳频方式可称为一般跳频。在科技进步后, 给出了适应型跳频形式, 可进行频率、功率两个因素的适应性调整。跳频传输中, 频率图能够有效反映收发信号的频率波动特征, 确保收发信号的可循性, 防止被他人获知。一般情况下, 跳频码序列的设计方式有三种: 一是 m ; 二是 M ; 三是 R_s 。各类码序列给出的跳频图均具有随机性, 此种随机码的形成, 可使用移位寄存器获取; 此结构具有组成简易、性能平稳、跳频图案同步速度快等优势; 此种码序列方式, 能够适应较长时间段的信号传输。

1.1.4 跳频技术的运行条件

等同于其他类型的数字信号传输技术, 跳频技术能够进行多种信号同步, 比如载波、帧。跳频技术应用时, 载频表现出序列随机性, 为保证信号传输质量, 收发两端需进行跳频图案的同步设计, 保证在相同时间跳频规则的一致性。为此, 在信号传输时, 需进行跳频规则的同步处理。跳频科技进行规则同步时, 共有两个同步要求: 一是短时间内高效完成同步; 二是确保同步效果。跳频电台在进行同步处理时, 含有精确时钟、FFT 捕获等方法。跳频科技实践应用时, 会融合各类同步方法。扫描环节会记录步头节点的频率,

驻留环节会提取步头存储的同步资料,以此达到双发跳频规则的同步目标。具有适应能力的跳频技术,对其进行同步处理,含有频率更新段的更新环节,以此更新受干扰位置的频点,保持双方频率规则的一致性,防止通信失败。

1.2 FMCW雷达

1.2.1 FMCW概述

FMCW可称为可调节频率的、持续传输的信号波,FMCW雷达是使用此种信号波进行高精度距离测量的技术。测量期间,信号传输频率的浮动规则为“三角波”。FMCW收发信号的频率具有浮动规则的一致性,均为“三角波”,波中含有一组时间差,利用较小间隔的时间差获取目标距离。

1.2.2 连续波雷达

此种雷达具备回传信息分析功能,判断回传信号的多普勒偏移情况。脉冲雷达在进行距离测量时,脉冲宽度取值直接决定着距离检测质量,分辨长度无法精细至小于15m的范围,限制了脉冲雷达的可用范围。因此,脉冲雷达无法用于大气层的探测任务。在1960年研发成功的连续波雷达,可用于大气环境的探测活动,具有较强探测灵敏性,能够增加距离分辨的清晰性,使用大气层环境的各类环境,比如大气回波、边界层波动等。此外,连续波雷达可结合边界层气象特点,给出观测资料。在50ms时间范围内,可进行特定方向的雷达信号发射,在另一端进行信号回收,测定频率差值,判断目标物与监测站的间距。连续波雷达分辨长度最小值 h_{min} 的计算方法如下:

$$h_{min}=c \times k-1 \times f$$

在公式中, c 表示光速, f 表示连续波的频率浮动值, k 表示常数,用于判断分析器的信号分析能力。当频率浮动值为200MH时, $h_{min}=1.5m$ 。

1.2.3 技术问题

一般类型的FMCW雷达运行时,利用调制信号方式进行测距控制,系统组成包括天线、压控振荡设备(以下简称“VCO”)等。其中,VCO是一种宽带振荡设备,具有电调谐特征。如果未对其进行线性调整,跳频线性结合会达到百分数级别。结合雷达测距的技术特点,当VOC线性结果不高时,收发信号之间存在一定频率偏差问题,会增加收发信号之间的频谱展宽,无法保障雷达测距结果的精确性。为此,对此种测距给予一定补充处理。

在电路设计方面,去除VCO的失真问题,加强电路优化、相位调整等。此类补偿方式,均无法切实提

升测距结果的精度级别,会相应增加系统运行负担。

1.2.4 技术融合

引入跳频科技,有效解决雷达收发信号存在的频谱无序叠加问题。在技术融合时,合理调整VCO传输的信号,进行跳变调整,以此减少相同传输路径中的信号混合问题。此种技术融合方法,无序进行电路优化,可降低系统运算量,提升系统运行能力,积极解决频谱无序的技术难点。在跳频技术融合下,可增加雷达带宽的优化能力,合理去除信号干扰问题,保障VOC窄带宽信号收发的有序性,达到抗干扰的技术目标。为此,以下内容开展无序信号形成、跳频技术融合的仿真分析,验证跳频技术融合的可行性。

2 信号无序叠加的形成

FMCW雷达中含有三角、锯齿两种信号波形,相比而言,三角波更具探测优势,主要表现在远程探测、高效探测两个方面,能够有效排除远程探测干扰,积极应对多普勒耦合,保证探测信息的精确性。为此,在研究时,以三角波形为重点,研究其雷达信号的无序叠加形成过程。现阶段,FMCW探测程序建立时,以毫米级为信号类型,探测方法有两种:一是振荡探测;二是倍频探测。在振荡探测时,VCO干扰的排除方法,主要是在直流电压条件下,合理调整变容二极管,保持传输信号、直流电压处于同步变化状态。在使用倍频探测方法时,利用较低频段的VCO,对其进行倍频器处理,达到信号频段调整的目标。在探测中使用的低频VCO,在进行振荡处理时,使用变容二极管。然而,二极管的使用,携带一定电调谐特征。为此,VCO在传出信号时,表现出非线性特征。

假设VCO传出的信号中,传出信号频率为 f_1 ,回传信号频率为 f_2 , f_1 与 f_2 的传出时延为 t , f_1 的初期传出信号频率为 f_0 ,调整信号频率的带宽参数为 B ,调整周期为 D , $f \Delta +$ 表示在三角波信号增长段中 f_1 与 f_2 的差值, $f \Delta -$ 表示在三角波信号下滑段中 f_1 与 f_2 的差值。设定运动目标并未发生位置改变,保证探测结果的代表性,设定被测主体与雷达信号的相对运动速度为 v ,获取信号产生多普勒偏差结果为 f_3 ,此时 $f \Delta +$ 不等于 $f \Delta -$ 。当 $f_3=0$,则有 $f \Delta + = f \Delta - = f_3$ 。在第 i 次发生频率差值时,形成的中心频率为 $f_{30}(i)$,则 $\Delta f_{30}(i)$ 对应的是频谱变幅。频谱变化的幅度,会增加频谱无序叠加的严重性。

当两组相距较小、频段相似的FMCW雷达机组共同运行时,相当于在相同路线中运行两组雷达,极易形成频谱无序叠加现象。产生此种现象的原因:一是

表1 仿真参数

| | | | |
|-----|----------------|----------|--------|
| 项目 | 频谱调整初期频率 f_0 | 跳频前期带宽 B | 信号非线性 |
| 参数值 | 24GHz | 100MHz | 0.1% |
| 项目 | 初期间距 | 运动速度 | 信号采集频率 |
| 参数值 | 100m | 33m/s | 100GHz |
| 项目 | 跳频周期 | 跳频频率间隔 | 跳频时间间隔 |
| 参数值 | 31s | 300MHz | 10ms |

VCO 信号特征引起频谱发生变动；二是频率调整时的带宽较小，可进行信号频率调整的操作范围受限，形成频谱交叉、叠加等问题。时间、频率的变动范围，具有相互对应特点。如果雷达探测回传的信息不具真实性，会直接形成探测结果的偏差问题，无法保障探测质量^[1]。

3 跳频技术消除频谱无序叠加的过程分析

在较小范围的带宽条件下，能够保证 VCO 传输电压、传出频率之间的有序性，可进行窄带区域内的频率调整处理，便于在较宽频段区域内进行扫频操作，即带宽范围固定，中心频率具有可调整性，使雷达传输信号运行方式为“宽带扫频”，以此减少相邻信号之间发生叠加，切实排除信号干扰。信号无序叠加现象的形成，主要源于雷达设备处于等同带宽、相似频段。在跳频技术融合时，改变频段，以此减少频谱叠加问题。在跳频技术引入后，差频信号 f_{Δ} 中含有两类频段，其一为初期传输的频段，其二为新增的跳频频段。在此种情况下，如果发生频谱无序叠加现象，仅会形成部分位置的频谱混乱现象。此时仅需进行适当处理，即可恢复信号状态，排除频谱无序叠加带来的不利因素。雷达传输的调整频率信号时，其带宽表示方法是： $Bt=N \times B$ 。在关系式中，N 表示跳频时间，B 表示带宽。Bt 是指原有信号带宽 B 乘以跳频时间 N 倍，以此有效回避频谱叠加问题，切实增强雷达相邻传输路线的顺畅性。

4 仿真分析

4.1 仿真参数

采用表 1 中的仿真数据进行频谱调整，跳频频率具体是指：在 VCO 传输频谱调整信号时，使用载波频率进行处理，此时随机产生的虚假码，对数字合成程序形成控制产生的载波频率。具有随机性的虚假码，使用 PN 表示，是一种 5 级 m 序列，可获取载波频率。当载波频率个数为 31 时，设定周期值为 31，进行随机

跳变处理，以此保证通信质量，减少干扰威胁。

4.2 仿真结果

为获取对比效果，仿真模拟时，选择相邻距离较小的两组雷达设备。在运行时，初期频率 f_0 参数为 24GHz，带宽 B 参数为 100MHz。仿真结果中，回传信号的 B 值，等同于信号传输时的 B 值，两个 B 值对应的频段具有差异性。在仿真运行时，频谱变动幅度约为 1MHz，此时可能发生频谱无序叠加现象。在使用跳频技术优化后，差频信号中含有新增频带，在发生无序叠加问题时，此新增频带可进行信号修复，以此去除叠加影响。

经仿真发现：跳频技术频率调整完成时，传输信号拥有两个可用频带，可使回传、差频两组信号均在可用频带中，切实减少了频谱叠加问题；新增的频带，可称为“镜像频带”，具有信号修复能力，保证雷达探测功能的平稳性；跳频技术，用于优化雷达探测性能、排除干扰因素中，具有可行性^[2]。

综上所述，对 FMCW 雷达进行信号优化时，引入跳频技术，能够有效消除信号无序叠加问题，切实增加雷达距离、速度探测结果的精准性，积极排查信号叠加带来的干扰问题。由仿真实验发现：跳频技术的合理使用，可改变相邻雷达的信号传输频段，创建可用的信号传输频带，积极去除信号混叠问题，确保雷达使用效果。

参考文献：

- [1] 冯建利. 基于跳频技术的 FMCW 雷达超宽带调频抗干扰方法 [J]. 电讯技术, 2021, 61(11): 1365-1370.
- [2] 靳科, 赖涛. 近距离超宽带调频连续波雷达非线性校正研究 [J]. 信号处理, 2017, 33(02): 158-167.