

光缆架空对模拟信号传输性能的影响

熊慎伟¹,陈国帅²

(1.中国电子科技集团公司 第十四研究所,南京 210039;2.中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:在模拟信号光传输过程中,光缆架空后因光缆晃动和温度变化会造成相位噪声和多路相位稳定性指标的劣化。理论分析了光缆晃动对传输信号相噪劣化的原理,并通过实验得到相噪劣化的测试数据,计算分析了温度变化对多路信号光纤传输后相位稳定性和一致性的影响,可以认为在模拟信号光传输时采用直埋方式铺设光缆是最为可靠的方案。

关键词:模拟信号光传输;光缆架空;相位噪声;多路相位稳定性

中图分类号:TN91 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)04-0038-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.04.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of optical cable overhead on analog signal transmission performance

XIONG Shenwei¹, CHEN Guoshuai²

(1. The 14th Research Institute of CETC, Nanjing 210039, China; 2. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In the process of analog signal optical transmission, the phase noise and multi-channel phase stability will be deteriorated due to the oscillation and temperature change of the optical cable overhead. The principle of phase noise degradation of transmission signal caused by optical cable shaking is analyzed theoretically, and the test data of phase noise degradation are obtained by experiment. The influence of temperature variation on phase stability and consistency of multi-channel signal optical fiber transmission is calculated and analyzed. It can be considered that laying optical cables directly buried in analog signal optical transmission is the most reliable scheme.

Key Words: analog signal optical transmission; optical cable overhead; phase noise; multi-channel phase stability

0 引言

在现代雷达中,分布式相控阵雷达(如多基地雷达、超视距雷达等)有着十分重要的作用,由于多路接收机分布在较远距离上,一般从几千米到几十千米,需要采用光纤传输时钟、本振等模拟信号。该种雷达需要在复杂信号环境下,检测弱小目标和慢速目标,因此模拟信号经光传输从主站到达各个接收机后质量要求高,尤其是相位噪声及多路信号相位稳定性等指标。光缆铺设方式主要有2种:架空方式铺设和直埋方式铺设(含地理和管道)。架空方式简单经济,而

直埋方式比较复杂,尤其在人口稠密区或过大山时,因此通常采用架空方式铺设。但要传输模拟信号时,需要考虑光缆架空后对信号相噪指标、多路信号相位稳定性指标的影响等问题,这些指标的劣化是致命的,会严重影响雷达的正常工作。本文详细分析光缆架空后对模拟信号传输性能的影响,并进行实验测试及数据分析,得到可以指导工程应用的结果。

1 光缆架空对基准信号相位噪声指标的影响

模拟信号的短期稳定度是雷达系统的一个核心指标,一般通过测量信号偏离1Hz~10kHz处的相位噪声指标来衡量。相位噪声的定义就是信号在几秒、几毫秒甚至更短时间内的随机起伏程度,也称短期频率稳定度,其本质反映了信号的频谱纯度。相位噪声对振动是极其敏感的,因为加速度的存在会使基准频率发生微量偏移,并存在如下关系:

$$f(t)=f_0+\Delta f \times \cos(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

收稿日期:2018-11-01。

作者简介:熊慎伟(1963-),男,江西南昌人,中国电子科技集团公司第十四研究所研究员级高级工程师,曾获得省部级科技成果特等奖2项、二等奖2项、三等奖1项。主要从事雷达接收机和光纤传输技术方面的工作。



其中, f_0 是基准频率, Δf 是频率偏移量, f_v 是振动频率。光缆架空方式基本上为 50m 左右间隔一根杆子铺设, 如果传输距离从几千米到几十千米计算, 需要立几十到几百根杆子, 在大风和沙尘暴天气时, 2 根杆子间的光缆会存在激烈的左右摆动和上下抖动 (统称为晃动), 不可避免地会使光缆内各芯光纤产生微量形变, 进而影响到光信号传输路径的变化, 各种光散射现象会加强, 导致光信号产生畸变, 最终导致传输信号的相位噪声指标劣化。

为了全面评估光缆架空对传输信号相位噪声的影响, 搭建了一个实验仿真的验证平台, 如图 1 所示。该实验平台由 2 根近 50m 长的 24 芯光缆、时钟光发模块、时钟光收模块、E8663 信号源、光衰减器和 PN9000C 相位噪声测试仪等组成, 光缆两边通过光缆终端盒固定引出尾纤。实验过程中始终保持终端盒不会振动, 以保证光纤连接点的稳定, 传输信号的频率选为 80MHz。

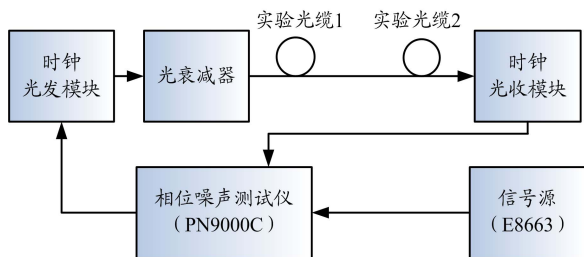


图 1 光缆架空验证平台组成框图

模拟光纤传输的工作原理是, 采用直接调制方式, 模拟电信号传给光发模块, 经信号缓冲电路和驱动电路, 将输入的电压信号转变成电流信号, 驱动激光器, 这样输入的电信号就转变成光信号, 通过精确对准, 耦合进入光纤。光信号经光纤传输后, 由光收模块中的光电探测器接收, 将光信号转变回电信号, 经低噪声放大器放大后再输出。

2 光缆架空对多路信号相位稳定性指标的影响

光缆架空后, 直接暴露在自然环境中, 不同光缆内部不同纤芯温差会急剧增加^[3,4], 尤其是太阳照射时, 会严重影响多路信号传输的相位稳定性指标。为了保证多路接收机回波信号合成为最佳, 要求传输后的多路信号相位稳定性指标 $\leq 5^\circ$ 。

当光波以速度 v 传播的时候, 长度为 L 的光纤产生的时延可表示为:

$$\Delta t = L/v = (L\eta)/c \quad (2)$$

其中, η 为光波在光纤中的折射率, 普通光纤的折射率

一般取 1.467, c 为光波在自由空间中的传播速度。当取 $\eta=1.467$, $c=3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ 时, 由式(2)计算得光纤延迟时间 Δt 约为 4.9ns/m。电信号在铜线里的传播速度是自由空间的三分之二, 约为 $2.0 \times 10^8 \text{m/s}$, 换算成时延为 5ns/m。因此单位长度的铜质电缆线和光纤的随长度相位变化几乎是一致的。80MHz 时钟周期为 12.5ns, 在光缆内可归一化时延为 34.7ps/1°。

设光缆环境温度随时间变化, 则根据成缆光纤的温漂系数的定义, 在光缆线路上温度变化分布相同时, 由光缆线路温度变化引起的漂移量可用式(3)计算:

$$\tau_m = K_f L \theta_m \quad (3)$$

其中, τ_m 为漂移量(ps), θ_m 为温度变化的峰峰值(°C), L 为光缆线路的长度(km), K_f 为光缆的温漂系数。在 $-40^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ 温度环境下, G.652 普通光缆的温漂系数大约为 $26 \sim 44 \text{ps} \cdot (\text{km} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ^[5], 其变化规律是区间分段变化的。

对于分布式相控阵雷达系统而言, 需要到达多路接收机的时钟等信号相位一致, 尤其是不允许随机变化。由于模拟信号在不同光缆传输, 任 2 根光缆表面温差可达 10°C ^[4] (一边靠太阳另一边背着太阳)。采用国产光纤, 按照 $44 \text{ps} \cdot (\text{km} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 计算, 架空传输 5km 后, 根据式(3)计算任 2 根光缆的最大时延差: $\tau_m = 5 \times 44 \times 10 = 2200 \text{ps}$, 相当于 31.7° 相位变化 80MHz, 大大超过了多路信号相位稳定性指标。对于因光纤长度差异引起的固定相差可以通过配相光缆或电缆来解决, 但对于白天日照变化、昼夜温度变化和季节温度变化引起的动态相差, 在工程应用上很难解决, 因为这个相差是一个随机快速变化的无规律函数。这将引起多路接收机回波信号无法线性相加, 形成不了雷达波束, 影响雷达正常观测目标。

如果光缆直埋地内 1.5m 左右, 同一地区任 2 根光缆气温没有变化^[3,4], 则多路信号相位稳定性指标基本不变。

3 光缆晃动对相噪影响的实验测试结果及分析

温度对模拟光链路相位的影响已经有了很多相关研究结论^[6], 但是光纤抖动对于传输信号相位噪声的影响却少有相关的量化实验数据, 本文通过模拟实际工程应用中架空光缆的晃动, 再结合现有的模拟光通信设备和相噪测试平台 (PN9000C) 进行了本底相位噪声测试, 进一步探索了光纤抖动对相位噪声的影响程度。

为了尽量真实模拟架空光缆在自然条件下受到风吹影响而发生的光缆晃动,实验中共进行了以下几种情景模拟:

①小幅晃动光缆实验(模拟小于5级的中低速风)。由于架空光缆施工时通常与固定钢缆绑定,风力微弱时并不会有明显晃动,小幅晃动实验模拟的是处于中等风速时光缆的晃动情况。在实验过程中用手晃动光缆使其缓慢左右振动和上下抖动,晃动频率约1~2Hz,光缆晃动幅度约 $\pm 5\text{cm}$ 。

②大幅晃动光缆实验(模拟大于6级的高速风)。当架空光缆处于高速风的吹拂时,光缆的晃动幅度和频率均有所增加。在实验过程中用手晃动光缆使其左右振动和上下抖动,动作与小幅晃动类似,晃动频率约2~3Hz,光缆晃动幅度约 $\pm 10\text{cm}$ 。

③同时不同步晃动光缆实验。由于架空光缆都是由大量的架空线杆支撑固定,当风吹拂光缆时每2个架空线杆的光缆晃动并不可能同步,同时不同步晃动实验模拟的就是这种情况下的光缆变化。在实验过程中用手同时不同步晃动2根光缆,使其左右振动和上下抖动,动作与小幅晃动、正常晃动类似,晃动频率约2~3Hz,光缆晃动幅度约 $\pm 5\text{cm}$ 或 $\pm 10\text{cm}$ 。

3.1 实验结果

正常光传输后光链路本底相位噪声测试数据如图2所示。

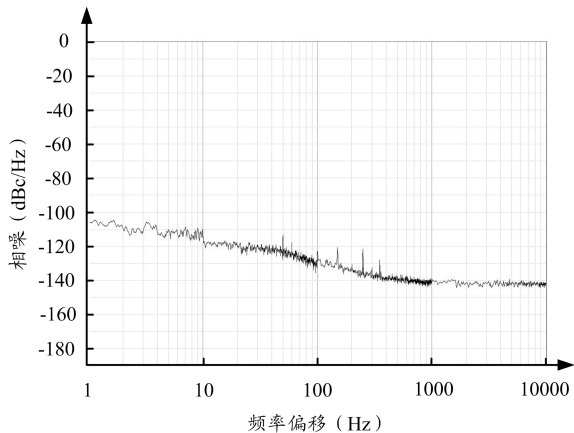
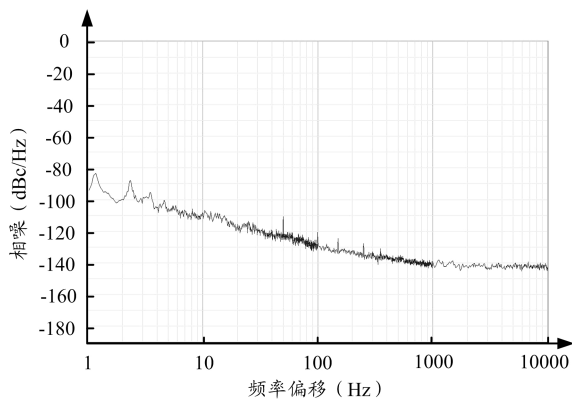


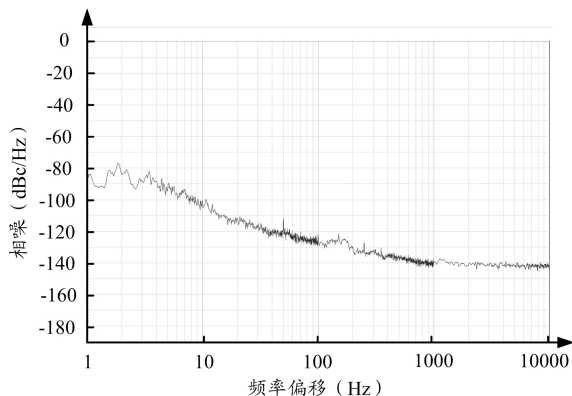
图2 光传输链路本底相位噪声测试曲线图

以小幅均速晃动光缆1,测试结果如图3(a)所示,同样小幅均速晃动光缆2测试与此结果类似。以相同幅度及频率同时不同步晃动2根光缆,测试结果如图3(b)所示。

大幅晃动光缆1,测试结果如图4(a)所示。同样大幅晃动光缆2测试结果与此类似。以相同幅度和频率同



(a) 小幅晃动光缆1相位噪声测试曲线图



(b) 2根光缆同时不同步小幅晃动相位噪声测试曲线图

图3 小幅晃动光缆相位噪声测试曲线图

时不同步大幅晃动2根光缆,测试结果如图4(b)所示。

3.2 实验结果分析

通过对以上实验数据进行分析,可以得到以下几个结论:

①光缆的晃动对传输信号的相位噪声会产生较大的劣化。

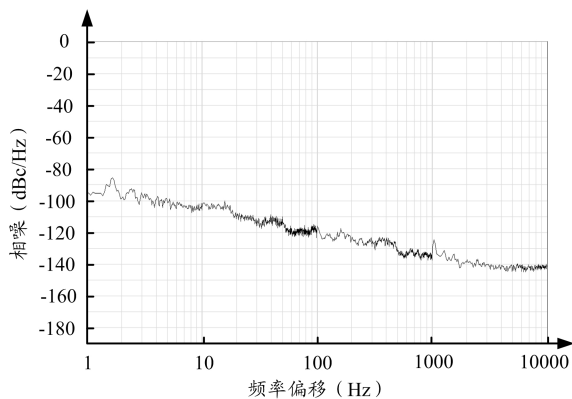
②光缆晃动对传输信号相位噪声的劣化程度与晃动幅度、晃动频率相关:

▲当晃动的幅度在 $\pm 5\text{cm}$ 内时,对1Hz的相位噪声会产生10dB左右劣化;对1~10Hz区间的相位噪声会产生5~20dB总体恶化,3Hz之前劣化明显。

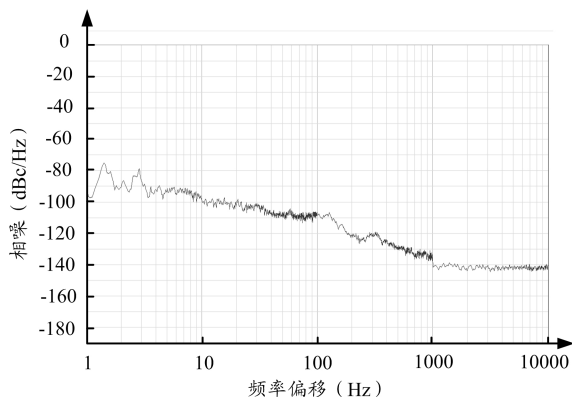
▲当晃动的幅度在 $\pm 10\text{cm}$ 内时,对1Hz的相位噪声会产生15dB左右劣化;对1~10Hz区间的相位噪声会产生10~35dB总体恶化,3Hz之前劣化尤为明显。

▲同时晃动多根光缆,由于晃动幅度和频率叠加会增加对传输信号相位噪声的劣化程度。

③实际工作时,由于光缆晃动的幅度可能比实验中更大,晃动的频率可能比实验中更高,而且没有一



(a) 大幅晃动光缆 1 相位噪声测试曲线图



(b) 2 根光缆同时不同步大幅晃动相位噪声测试曲线图

图 3 大幅晃动光缆相位噪声测试曲线图

定的规律性,相位噪声的变化将更复杂;同时晃动的光缆根数更多,叠加效应更强,相位噪声的劣化程度也更大。

④由于光缆埋地后基本上不会有剧烈的振动和抖动,因此也可以避免因物理抖动带来的相噪劣化。

4 结束语

本文分析并仿真了光缆架空后对模拟信号传输性能的影响,仿真结果表明:光缆架空之后的晃动会对模拟信号光传输后的相噪指标造成极大的劣化,产生 10~35dB 总体恶化,而且不同光缆温差急剧增加而引起的相位的剧烈波动也会远超技术要求。实际上,光缆晃动的幅度、频率情况比实验仿真更复杂,同时晃动光缆根数更多,叠加效应更强,相位噪声和相位稳定性的总劣化程度更大,这 2 个指标的劣化是致命的,影响了雷达检测弱小目标和慢速目标,严重时会影响雷达正常工作。在使用直埋方式时却因为地下温度的恒温特性和物理上的稳定特性避免了温度和振动对光缆的影响,因此可以认为在模拟信号传输时,采用直埋铺设方式是最为可靠的方法,其研究成果已在实际工程上得到了应用。

参考文献:

- [1] 戈稳. 雷达接收机技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [2] 郭崇贤. 相控阵雷达接收技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [3] 代玉峰,卢麟,王荣,等. 光纤频标传递系统的稳定性仿真[J]. 中国测试,2009,35(5):30-33.
- [4] 余雷,向文祥,胡振,等. OPGW 光缆内部光纤分布式温度测量[J]. 光通信研究,2014(6):45-47.
- [5] 马志超,何翠平,王绍雷. 环境温度对单模光纤中光信号传输延时的影响[J]. 光通信技术,2015,39(5):15-16.

2019 全国微波光子雷达技术研讨会即将召开

微波光子雷达利用光子技术实现宽带微波毫米波信号的产生、分配、控制和处理,能够有效提升雷达系统的目标分辨率、作用距离、响应速度等关键性能,有助于实现侦察、干扰、探测、通信的一体化,近年来受到了国内外同行的广泛关注。美国海军实验室做出了“光子学照亮雷达未来”的评价,而俄罗斯、欧盟等都在开展实用化微波光子雷达相关的研究。基于这种形势,在多位院士的提议下,中国电子学会拟于 2019 年 4 月 27-28 日在南京举办“2019 全国微波光子雷达技术研讨会”。

主办单位:中国电子学会

协办单位:中国电子学会雷达分会

大会交流形式:大会将邀请相关领域的著名专家,就光子技术在雷达领域的应用做特邀报告。

联系方式:中国电子学会学术交流中心项目负责人 张杰

联系人:骆阳;电话 010-83687508 手机:13521652196 邮箱:ly_job@163.com