

eLORAN系统的GRI组合设计研究

刘时尧^{*①③④} 张首刚^{①②} 华宇^{①③}

^①(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

^②(中国科学院时间频率基准重点实验室 西安 710600)

^③(中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室 西安 710600)

^④(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 针对增强型罗兰(eLORAN)系统增补发射台站建设中的组重复周期(GRI)选择问题, 该文主要从数学的角度出发, 提出一种基于交叉干扰率的筛选算法。该算法首先考虑了最小可用组重复周期以及秒信息量的要求, 并在此基础上通过比较与临近的罗兰C台站间的相对交叉干扰率进行1次筛选; 之后通过排列组合进行两两比较并2次筛选; 最后, 综合考虑数据率要求、系统规范、无交叉干扰等条件, 得到最优组重复周期组合。随后, 鉴于新型eLORAN系统的高精度授时要求, 在GRI最优组合中进行了优选。分析结果表明, 该方法得出的优选组合的平均交叉干扰率与现有导航台链相当, 同时可兼顾授时需求, 可以为高精度地基授时系统建设提供参考性建议和理论依据。

关键词: 罗兰C; 增强型罗兰; 组重复周期; 符合时间间隔; 交叉干扰率

中图分类号: TN961

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)02-0767-08

DOI: [10.11999/JEIT201066](https://doi.org/10.11999/JEIT201066)

Research on GRI Combination Design of eLORAN System

LIU Shiyao^{①③④} ZHANG Shougang^{①②} HUA Yu^{①③}

^①(National Time Service Centre, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

^②(Key Laboratory of Time and Frequency Reference, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

^③(Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

^④(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To solve the problem of Group Repetition Interval (GRI) selection in the construction of the enhanced LORAN (eLORAN) system supplementary transmission station, a screening algorithm based on cross interference rate is proposed mainly from the mathematical point of view. Firstly, this method considers the requirement of second information, and on this basis, conducts a first screening by comparing the mutual Cross Rate Interference (CRI) with the adjacent Loran-C stations in the neighboring countries. Secondly, a second screening is conducted through permutation and pairwise comparison. Finally, the optimal GRI combination scheme is given by considering the requirements of data rate and system specification. Then, in view of the high-precision timing requirements for the new eLORAN system, an optimized selection is made in multiple optimal combinations. The analysis results show that the average interference rate of the optimal combination scheme obtained by this algorithm is comparable to that between the current navigation chains and can take into account the timing requirements, which can provide referential suggestions and theoretical basis for the construction of high-precision ground-based timing system.

Key words: Loran-C; Enhanced LORAN (eLORAN); Group Repetition Interval (GRI); Time Of Coincidence Interval (TOCI); Cross-Rate Interference (CRI)

收稿日期: 2020-12-18; 改回日期: 2021-07-12; 网络出版: 2021-12-08

*通信作者: 刘时尧 liushiyao@ntsc.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(11803040), 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC034)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (11803040), The Key Research Program of Frontier Sciences of CAS (QYZDJ-SSW-JSC034)

1 引言

21世纪初期, 鉴于GPS的脆弱性, 美国政府开始研究评估增强型罗兰(Enhanced LORAN, eLORAN)系统作为GNSS备份的可能性, 期间国际罗兰协会(ILA)公布了《eLORAN定义文件》, 为用户提供了eLORAN的顶层定义, 并指出了该系统的重要性。随后, 韩国、英国、俄罗斯等多国均开始了eLORAN相关技术研究。2018年, 美国政府签署了《国家安全与弹性授时法案》, 计划两年内建设针对GPS的地基备用系统。而我国也于2017年启动了“高精度地基授时系统”项目, 旨在与北斗卫星系统相结合成为我国完善的星地一体化高精度定位、导航、授时(Position Navigation Timing, PNT)系统。

eLORAN授时系统是我国高精度地基授时系统的重要组成部分, 它是一种远距离、大规模的低频无线电导航授时系统^[1]。其授时发播信号以国际标准罗兰C信号为基础, 采用最新的Eurofix数据链技术进行三态脉冲位移平衡调制(Pulse Position Modulation, PPM)实现增强数据信息发播, 具有作用距离远、稳定性好、可靠性高、抗干扰能力强等优点^[2]。作为独立的陆基系统, 虽不同于星基系统但它是其重要的补充系统^[1]。eLORAN接收机是通过接收3个不同台站的地波信号, 测量其时间差(TDOA), 并根据双曲线定位法来计算目标位置从而实现定位导航功能的。定位导航功能的实现不可避免地会受到连续波, 天波、各种噪声以及交叉干扰等影响^[3]。但相对于连续波干扰, 天波干扰等被动干扰, 交叉干扰作为主动干扰, 是发播控制必须要重视的根源性问题之一。而交叉干扰率主要取决于各台链组重复周期(Group Repetition Interval, GRI)的设计选择, eLORAN接收机在接收到不同台链的地波信号时, 若信号脉冲组重复周期最小公倍数过小(重叠频率高), 势必会使交叉干扰的频率增大, 从而影响导航定位授时的功能。因此如何降低交叉干扰率就是GRI组合选择的一个核心问题, 而不同的台链个数(主台个数)等因素也会对GRI的选择造成影响。

eLORAN增补台站的建设除了基础设施及信号覆盖范围的考量外, 最为核心的就是GRI设计选择。近年来, 随着各国对eLORAN系统的重视及发展, 其信号体制方面的相关研究越来越多, 包括信号衰减函数、交叉干扰对接收性能的影响、抗交叉干扰算法、信号覆盖范围以及TDOA测量方法等方面的深入研究及总结^[4-10], 都从侧面反映了抑制交叉干扰的重要性, 但目前对GRI设计方面的研究还

比较少。本文在综合考虑和结合之前研究成果的基础上, 从交叉干扰的根源出发, 并结合新型eLORAN系统的更多需求进行理论研究, 旨在得到GRI优选的理论方法, 并给出最优的GRI组合。同时, 为了满足高精度地基授时系统项目的3个即将新建eLORAN增补台站(敦煌、那曲、库尔勒)对信号体制设计的迫切需求, 本文从最优GRI组合中做出有针对性的选择, 在减少交叉干扰的同时保证高数据率, 它既满足eLORAN授时系统对时码信息的需求, 又有利于信号的捕获跟踪, 避免高交叉干扰导致接收机失锁带来的授时精度损失, 可以充分保障我国eLORAN授时系统的PNT服务功能, 并且为国内外eLORAN系统的建设提供思路及理论参考依据。

2 最小可用GRI要求

罗兰C信号以脉冲组的形式发射, 主台每个脉冲组9个脉冲, 副台每个脉冲组8个脉冲, 其中每组前8个脉冲间隔为1 ms, 而主台的第9脉冲与第8脉冲间隔2 ms; eLORAN信号与传统的罗兰C信号的区别主要是增加了数据通道, 标准eLORAN脉冲波形及主台脉冲组波形如图1所示。

GRI是指同一发射台发射的相邻两脉冲组之间的时间间隔。在罗兰系统中, 相同台链的所有发射台发射信号的GRI相同, 所以GRI也是罗兰系统中区分台链的标识。

罗兰系统是利用双曲线定位法进行导航定位的, 3个几何分布合理的发射台站可以组成导航台链, 以实现导航功能, 因此在设计授时增补台站组重复周期时要充分考虑系统后期的扩展性和增强性, 即考虑后期建设副台以实现导航功能。所以, 根据长波导航主、副台的基线长度、副台数目、脉冲间隔、安全时延等条件可以决定最小的脉冲组重复周期, 其基本原则主要是必须保证台链的覆盖区内总是在时间上依次接收到主台、副台1、副台2等的信号并且同一台链各个台站信号间不会发生相互干扰, 因此各副台必须有足够的发射延迟, 这样就限定了一个最小可用GRI, 它可以用公式表示为^[11]

$$GRI_{\min} = \sum_{n=0}^N (\Delta t_{n,n+1} + \beta_{n,n+1}) \quad (1)$$

其中, GRI_{\min} 是该台链最小可用GRI; N 是台链的副台总数; $\Delta t_{n,n+1}$ 是必须保证的延迟量, 当 $n=0$ 时, $\Delta t_{0,1} = 10.9 \text{ ms}$; 当 $n \geq 1$ 时, $\Delta t_{n,n+1} = 9.9 \text{ ms}$; $\beta_{n,n+1}$ 是基线延迟, $\beta_{0,1}$ 是主台和第1副台的基线延迟, $\beta_{n,n+1}$ 是第 n 副台和第 $n+1$ 副台的基线延迟, $\beta_{N,N+1}$ 是主台和第 N 副台的基线延迟。

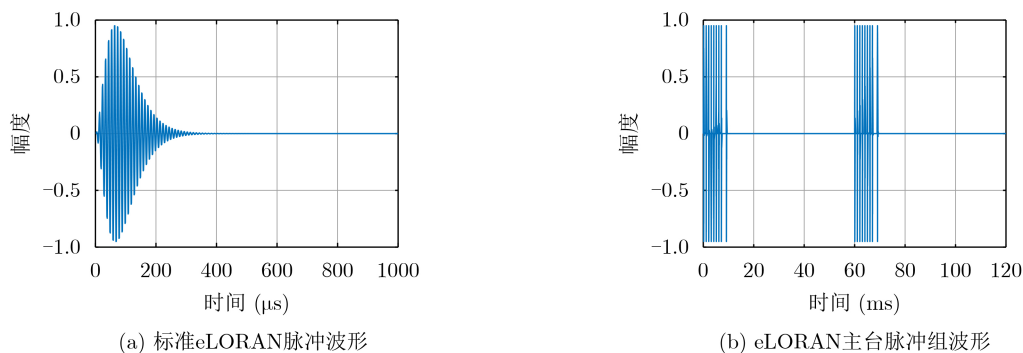


图1 eLORAN脉冲波形

按照此原则并根据1975年2月11日联邦登记册第40卷29号公布所示, 罗兰C系统允许的GRI范围是从40000到99990 μs , 允许的最小间隔为10 μs 。通常, GRI用其数值除以10 μs 的倍数(4位数)来表示。例如, 某台链的GRI为99600 μs , 即可用9960这个4位数来表示该台链的GRI^[12]。

3 算法描述

3.1 符合时间间隔(Time Of Coincidence Interval, TOCI)要求

Loran-C系统初期是美国海军出于军事目的研制的长波导航定位系统, 而eLORAN系统是在其基础上发展而来的下一代罗兰系统, 是国际标准化的高精度PNT服务系统。考虑到其高精度授时功能, 秒信息(即整秒时间信息)的发送就成了GRI选择时一个值得重视的问题。符合时间(Time Of Coincidence, TOC)间隔(单位: s)是整秒和相位编码间隔(Phase Code Interval, PCI)的最小公倍数, 用字母TOCI表示, 每个相位编码间隔由两个GRI组成^[12], TOCI计算公式为

$$\text{TOCI} = m \times 10^6 = n \times \text{PCI} = n \times 2\text{GRI} \quad (2)$$

其中, m, n 是整数; $\text{GRI}=40000\sim 99990 \mu\text{s}$, 且为10 μs 的倍数。

我国现有的BPL及“长河二号”系统台链各发射台GRI^[13]及由式(2)计算得到的TOCI如表1所示。

根据eLORAN授时系统发射信号TOCI的计算原理, 由式(2)可得TOCI与GRI的关系如图2所示。

授时增补台站GRI的选择, 主要结合最小可用GRI, 考虑尽量提高授时秒信息量和数据信息量。一方面, 授时秒信息量的提高要求TOCI尽量小, 例如若取组重复周期 $\text{GRI}=99900 \mu\text{s}$, 则TOCI为999 s, 即每16 min 39 s才能发播1次秒信息, 不利于秒的发播量; 另一方面, 数据信息量的提高要求GRI尽量小。

3.2 交叉干扰分析

根据授时系统导航功能扩展的最小可用组重复

表1 我国长波各发射台组重复周期分配

台链名称	GRI(μs)	主台	第1副台	第2副台	TOCI(s)
BPL授时台	60000	蒲城	-	-	3
北海台链	74300	荣城	宣城	和龙	743
东海台链	83900	宣城	饶平	荣城	839
南海台链	67800	贺县	崇左	饶平	339

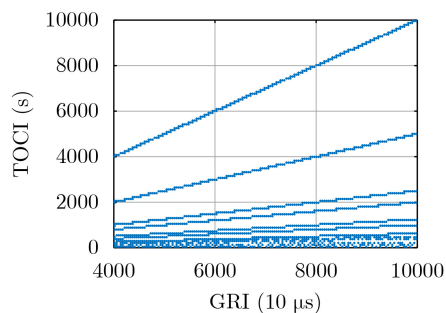


图2 TOCI与GRI取值的关系图

周期要求和授时系统的TOC间隔要求, 可以找出28个符合要求的GRI。然而, 由于授时增补台站与现有的BPL授时系统和“长河二号”导航系统兼容, 载波频率和相位编码是完全一样的, 而不同的台链是靠不同的脉冲组重复周期(GRI)来区分的。如果一个区域有若干个台链同时工作, 不同台链的信号相互之间将产生干扰, 即交叉干扰。

授时增补台站组重复周期的选择必须充分考虑增补台与现有长波台站之间以及增补授时台相互之间可能产生的交叉干扰, 从而选择正确、合理的组重复周期, 进而将交叉干扰限制到最低的程度。

交叉干扰产生的机理在于: 由于两个台站的GRI不同, 因此在信号范围内的任一固定位置, 两个台站的信号必定会根据时延差的周期变化而产生周期性叠加效应, 即交叉干扰。而接收机采样时将对被跟踪的需要信号和不需要的干扰信号同时进行, 这样势必在接收机的跟踪环路中引入误差, 进而导致时差。然而, 交叉干扰并不是时刻发生的, 它的产生需要同时具备以下3个基本条件:

(1) 接收地点位于两个或两个以上授时台站共同的信号覆盖区域;

(2) 跟踪台信号和干扰台信号的传播时延需要满足一定的代数关系;

(3) 接收地点与跟踪台和干扰台的相对位置要满足一定的几何关系。

图3给出了某地点跟踪台和干扰台信号之间的可能最大的干扰关系, 其中假设跟踪台GRI=60000 μs , 干扰台GRI=40000 μs 。虽然交叉干扰的影响与信号幅度大小有一定关系, 但由于此因素取决于传播路径、距离、场强等很多不可控因素, 因此这里在信号幅度一致的假设下进行讨论。

根据图3所示关系以及两个不同GRI信号间交叉干扰的时域关系, 可得交叉干扰周期 T_{interval} 为

$$T_{\text{interval}} = \frac{\text{GRI}_A \cdot \text{GRI}_B}{\text{GCD}(\text{GRI}_A, \text{GRI}_B)} \times 10^{-6} \text{ (s)} \quad (3)$$

其中, GCD为最大公约数运算符, $\text{GRI}_A, \text{GRI}_B$ 分别为跟踪台和干扰台的GRI。

从式(3)可以看出, 跟踪台与干扰台相互之间的交叉干扰周期是一样的, 且在GRI互质时达到最大。通过下面的分析可以看出, 交叉干扰周期在一定程度上反映了交叉干扰的强度, 即 T_{interval} 越小, 交叉干扰就越大。由图3可以看出, 当脉冲起始位置在0时刻对齐时, 干扰时间最长, 而如果两信号有一个时延, 则干扰时间缩短甚至不发生干扰, 也即交叉干扰的影响降低。考虑到每个单脉冲的有效延续时间 t_{pulse} 约为320 μs , 因此这里规定一个干扰间隔内的总干扰时长 C 为以 t_{pulse} 为标准的罗兰脉冲基础上干扰间隔内两个不同GRI所有罗兰脉冲间相互重叠的时间累积(这里忽略了eLORAN信号第3~8个脉冲的1 μs 的超前或滞后数据调制影响)。这里定义台站间的信号最大交叉干扰率为

$$v_{ij} = \frac{C}{T_i} = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} t_k \cdot \frac{1}{N_i \cdot t_{\text{pulse}}}}{\sum_{k=1}^{N_i} t_k \cdot \frac{1}{n_{\text{GRI}} \cdot m_i \cdot t_{\text{pulse}}}} \quad (4)$$

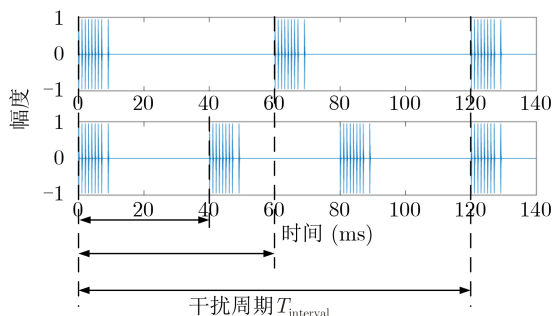


图3 两不同GRI台站的相互干扰关系图

其中, v_{ij} 为 j 台站对 i 台站的最大干扰率; C 为总干扰时长; t_k 为每个脉冲被干扰的时长; t_{pulse} 为脉冲有效时长(320 μs); N_i 为一个干扰间隔内的脉冲个数; T_i 为一个干扰间隔内的脉冲总时长; n_{GRI} 为一个GRI内主台的脉冲数; m_i 为一个交叉干扰间隔内 i 台站的GRI周期个数。

该定义相当于对交叉干扰率的影响赋予了一个与两信号之间交叉干扰程度相关的权重, 考虑了两信号之间交叉干扰程度对交叉干扰率以及数据解调正确率的影响。

根据对授时系统增补授时台地波信号覆盖范围的分析, 结合对BPL地波信号和“长河二号”地波信号的覆盖范围分析可知: 西部增补台站的地波信号覆盖区域主要与BPL授时系统地波信号的覆盖区域有较大的重叠部分; 考虑到未来全面实现导航功能, 除了已确定的3个授时增补台站以外, 未来西部可能需要建设更多台站以及副台组成台链。因此增补台以及BPL授时台之间的相互交叉干扰对其导航授时服务会造成很大影响。交叉干扰产生需要满足的各项条件有着诸多不确定的因素, 本文算法将以最大交叉干扰率 v_{ij} 的大小为核心来分析台站间的交叉干扰影响, 并结合其他因素及条件给出最优的GRI组合。最终, 根据系统建设需求推荐1组GRI组合, 以供3个确定的增补台使用, 并为其他未来可能的增补台提供GRI优选方法参考及理论依据。

另外, 交叉干扰分析还需考虑尽量满足无交叉干扰条件:

若两个GRI能够满足以下公式条件, 则在某些信号接收区域由于两台信号存在特定时延差关系, 将不存在交叉干扰。

$$\Delta\text{GRI} = \text{GRI}_A - \text{GRI}_B = (m_A - m_B) \cdot 1 \quad (5)$$

其中, $\text{GRI}_A, \text{GRI}_B$ 分别为两个不同台链的GRI; m_A, m_B 为正整数, 即 $\text{GRI}_A, \text{GRI}_B$ 为毫秒的整数倍。

在此条件下, 交叉干扰情况如图4所示(阴影处有交叉干扰)。

假设 O' 点为A, B两台脉冲组在某时刻恰好对齐处, 所标记时间间隔为以 O' 为接收点的信号传播时间关系。由双曲线特征可知, 某一双曲线上任意点到两焦点的差为定值, 因此根据eLORAN脉冲的有效长度及简单的几何关系容易得到, 若接收点位于A, B两焦点中的多个白色空白区域(例如点C), 则不会产生交叉干扰。在不考虑功率衰减时某些区域可以忽略交叉干扰的情况下, 计算几何面积可知无交叉干扰的区域甚至超过40%。

3.3 GRI组合优选

通过对最小可用GRI的计算、TOC间隔分析以

及交叉干扰率的分析, 可对备选组合进行优选, 步骤如下:

(1) 对12个备选GRI进行 C_{12}^3 排列组合, 得到924种备选组合;

(2) 计算每种组合的3个(增补台站需求)GRI两两之间的交叉干扰率, 进行求和平均, 比较得出平均交叉干扰率最小的5组组合作为备选;

(3) 筛选掉每个组合中单个相互干扰率超过设定阈值(20%)的组合, 以保证每个组合中的任意两个GRI之间的交叉干扰可控;

(4) 分析双工发播条件, 选择满足双工台每秒发播310个脉冲上限以及交叉抑制间隔要求的组合^[12]

$$\frac{GRI_1 \cdot GRI_2}{GRI_1 - GRI_2} < 2 \quad (6)$$

此两条件其一是为了控制双工发播台的发射功率以保护发播机的安全使用, 其二是为了保证两个不同GRI间的差 ΔGRI 足够大, 使信号不会被连续抑制以保障接收信号的锁定及其正常功能。

(5) 分析每组备选GRI的授时数据传输速率, 以高数据率为基础, 选择更好符合无干扰条件的GRI组合。目前授时系统采用的数据编码调制方式为每帧电文信息长度为30个GRI周期(210 bit), 即组重复周期越小, 授时数据信息传输速率越大。

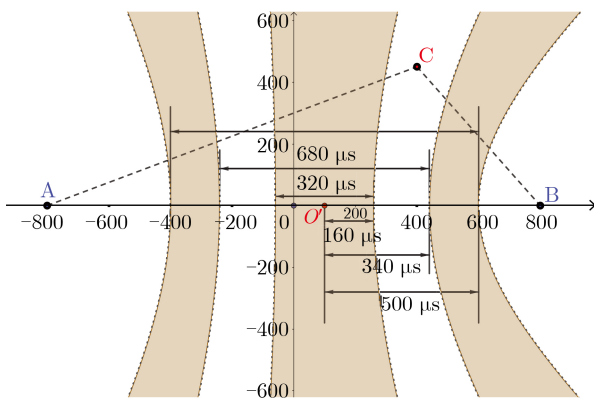


图4 无交叉干扰条件示意图

以上算法的整体流程如图5所示。

4 实验仿真

由于 $TOCI_{max}$ 过小时GRI可选范围较小, 不利于分析, 而 $TOCI_{max}$ 过大时GRI可选值虽多, 但考虑到其计算量及呈现复杂度, 因此本文以 $TOCI_{max}=20$ s为例根据以上优选算法进行分析, 得到其对应的最优GRI组合, 再以1 s为间隔拓展到 $TOCI_{max}=120$ s(通过以下分析可得出, $TOCI$ 过小则交叉干扰很大, 而 $TOCI$ 过大则不利于秒信息量的发播, 因此选择 $TOCI_{max}=20\sim 120$ s), 分别得到对应的最优GRI组合, 并在此范围内根据特定的系统建设需求进行优选推荐。

根据图2所示结果, 统计 $TOCI$ 小于20 s的28个GRI如表2所示。

计算并统计表2的GRI与BPL($GRI=60000 \mu s$)的28组交叉干扰率, 分析并筛选得到交叉干扰相对较小的12个GRI, 结果如表3所示。

通过3.3节的GRI组合优选步骤, 综合考虑各种条件及要求, 可以得到 $TOCI_{max}=20$ s时授时系统增补台GRI备选组合统计情况如表4所示, 并最终得出GRI优选组合为47500/81250/93750 μs 。容易验证, 该GRI组合两两均满足双工模式发播上限及交叉抑制间隔等要求。

接下来, 根据以上算法流程, 在不同的 t_{pulse} 假设下对 $TOCI_{max}=20\sim 120$ s(间隔为1 s)进行总体分析, 得到总交叉干扰率与 $TOCI_{max}$ 的曲线图如图6所示。

根据图6以及数据率统计结果可以看出, 不同的 t_{pulse} 假设对选择并没有影响, 因此本文以 $t_{pulse}=320 \mu s$ 为基础, 根据3.3节的GRI组合优选步骤, 在充分考虑低交叉干扰率与高信息传输速率等因素后, 分别对 $TOCI_{max}=20\sim 120$ s范围内各选1组理论上的最优组合, 并给出数据率曲线图如图7所示。

本文根据系统建设的授时功能需求, 提出了数据率阈值90 bit/s, 结合图6及图7兼顾低交叉干扰

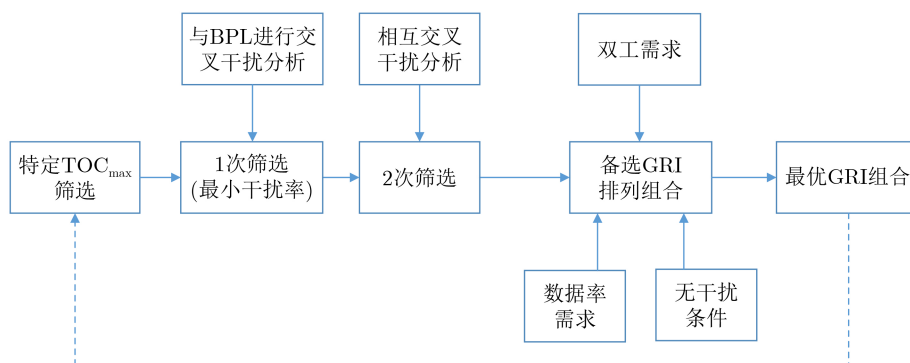


图5 GRI组合优选算法流程图

表2 TOCI小于20 s的GRI取值

GRI(μs)	TOCI(s)	GRI(μs)	TOCI(s)	GRI(μs)	TOCI(s)	GRI(μs)	TOCI(s)
40000	2	50000	1	65000	13	80000	4
42500	17	52000	13	68000	17	81250	13
43750	7	55000	11	68750	11	85000	17
44000	11	56000	14	70000	7	87500	7
45000	9	56250	9	72000	18	90000	9
47500	19	62500	3	75000	3	93750	3
48000	12	64000	16	76000	19	95000	19

表3 与BPL交叉干扰较小的GRI取值

GRI(μs)	TOCI(s)	交叉干扰周期 T_0 (s)	相互干扰率(%)	
42500	17	1.02	11.11	7.87
43750	7	2.1	7.62	5.56
47500	19	1.14	9.94	7.87
56250	9	0.9	8.29	7.77
62500	1	1.5	7.56	7.87
68750	11	3.3	4.85	5.56
76000	19	1.14	12.28	15.56
81250	13	3.9	4.10	5.56
85000	17	1.02	11.11	15.74
87500	7	2.1	5.40	7.87
93750	3	1.5	4.97	7.77
95000	19	1.14	9.94	15.74

表4 备选组重复周期互交叉干扰率(%)

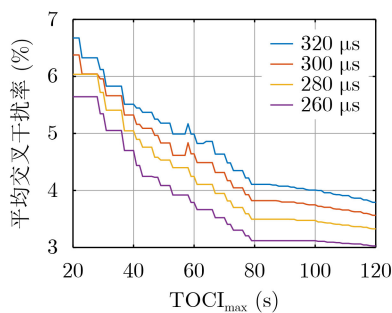
互干扰对应关系	备选组合(μs)				
	47500/ 81250/ 93750	81250/ 93750/ 95000	47500/ 68750/ 81250	68750/ 81250/ 95000	42500/ 81250/ 93750
	1-2	4.10 7.02	7.64 8.81	4.85 7.02	8.81 10.42
1-3	3.56 7.02	3.51 4.10	4.10 7.02	3.51 4.85	3.56 7.84
2-3	7.64 8.81	3.51 3.56		8.81 10.42	7.64 8.81
1-BPL	9.94 7.87	4.10 5.56	9.94 7.87	4.85 5.56	11.11 7.87
2-BPL	4.10 5.56	4.97 7.77	4.85 5.56	4.10 5.56	4.10 5.56
3-BPL	4.97 7.77	9.94 15.74	4.10 5.56	9.94 15.74	4.97 7.77
合计	78.36	79.21	80.09	80.94	81.18
均值	6.53	6.60	6.67	6.75	6.76

率及高数据率对以上101组备选组合进行筛选, 得到 $TOCI_{max}=58$ s 与 $TOCI_{max}=64$ s 时各一组GRI组合进行对比如表5所示。

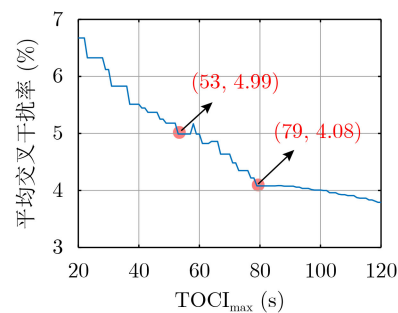
经计算, 以上两组组合与印度使用的GRI(55430 μs和60420 μs)^[14]间的最大交叉干扰率为(5.2%); 而“长河二号”系统(3.49%~4.88%)以及美国本土10个使用中的罗兰C台链的GRI^[15](2.93%~4.93%)交叉干扰率较表5所示更低, 这也符合当时罗兰C系统建设时定位导航之使用目的。而考虑到我国新型eLORAN系统的高精度授时功能, 需增加更多的限制条件, 如更多的单位时间秒

脉冲个数等(较小的TOCI), 自然也缩小了GRI的选择范围, 因此交叉干扰率略高, 但也符合新型eLORAN接收机的处理要求。另外通过对比可以得出:

- (1) $TOCI_{max}=64$ s时GRI组合的交叉干扰率较低, 为 $TOCI_{max}=58$ s时的81.76%;



(a) 不同 t_{pulse} 下平均交叉干扰率



(b) $t_{pulse}=320$ 时拐点位置

图6 $TOCI_{max}=20\sim 120$ s时平均交叉干扰率

(2) $TOCI_{max}=58$ s时数据率较高, 接近BPL授时台(116.67 bit/s), 更有利于时码信息的传播;

(3) $TOCI_{max}=58$ s时的GRI组合方案在平均TOCI方面有一定优势。

经过分析各种条件因素, 两种方案各有其利弊。虽然 $TOCI_{max}=58$ s时GRI组合的交叉干扰率较高, 但其数据率及TOCI方面的优势更有利于目前高精度地基授时系统项目的授时功能, 因此该文最终推荐的增补台站优选GRI组合为46400/66250/81250 μ s。该组合的3个GRI两两均满足双工台发播条件且部分满足无干扰条件, 这既有利于提高信号捕获及解调解码等的成功率, 也符合未来的多台链建设需求。

5 结束语

为了全面实现eLORAN系统高精度PNT服务, 必须在区域内有多台链的联合覆盖, 也必然会导致多台链GRI之间产生交叉干扰。而对授时服务的更高需求也使得其对GRI的选择与“长河二号”系统或国外的早期罗兰C系统相比提出了更高的要求。本文通过对秒间隔TOCI及最大干扰率这两个关键性指标进行综合分析, 并兼顾考虑GRI范围、国外台站干扰、高数据率以及双工台规范要求, 进行了两层筛选, 得到了最优化GRI组合。通过以上

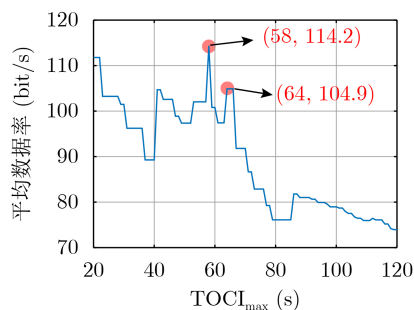


图7 $TOCI_{max}=20\sim 120$ s时平均数据率

表5 $TOCI_{max}$ 取58 s与64 s时最优GRI组合对比¹⁾

$TOCI_{max}$ (s)	平均TOCI (s)	GRI组合 (μ s)	总交叉 干扰率(%)	平均交叉 干扰率(%)	平均数 据率(bit/s)
58	41.33	46400/	62.03	5.17	114.23
		66250/			
		81250			
64	46	51200/	48.32	4.86	104.89
		76250/			
		81250			

¹⁾俄罗斯西部台链各个发射台距离我国边境均已超过3500 km, 且该台链的发射功率不强(1150 kW), 因此该台链各个台站的、地波信号均无法传播至我国境内以对我国台站造成影响。

结果可以看出, 谋求高的秒信息量和数据率就必然导致更高的交叉干扰率, 但本文算法在加权考虑多方面的因素的情况下得到的最优组合间的相互干扰与国内外导航台链相比并没有太大差距, 推荐的GRI组合在低交叉干扰率的基础上满足了高数据率、高秒信息量等需求, 满足了罗兰C系统最初的导航定位功能, 又符合了新型eLORAN系统对授时功能的需求。这在充分体现了该算法优势的同时, 也很好验证了其适用性。希望本文提出的方法可以为我国长波授时系统的信号体制设计提供思路及理论参考依据, 并在实践中得到一定的应用。

参考文献

- [1] 吴苗, 朱银兵, 李方能, 等. 无线电导航原理与信号接收技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 170-172.
WU Miao, ZHU Yinbing, LI Fangneng, *et al.* Radionavigation Principle and Signal Receiving Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 170-172.
- [2] VAN WILLIGEN D, OFFERMANS G W A, and HELWIG A W S. EUROFIX: Definition and current status[C]. Proceedings of IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium, Palm Springs, USA, 1998: 101-108. doi: 10.1109/PLANS.1998.669877.
- [3] 熊伟. Loran-C数字信号处理的关键技术研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2008.
XIONG Wei. Study on the crucial techniques of Loran-C digital signal processing[D]. [Ph. D. dissertation], National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [4] 周丽丽, 穆中林, 蒲玉蓉, 等. 不规则地形地波传播衰减因子的改进算法及结果一致性研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(9): 2254-2259. doi: 10.11999/JEIT150077.
ZHOU Lili, MU Zhonglin, PU Yurong, *et al.* Improved algorithm for ground-wave attenuation factor prediction over irregular terrain and results consistency study[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(9): 2254-2259. doi: 10.11999/JEIT150077.
- [5] SAFAR J. Analysis, modelling and mitigation of cross-rate interference in enhanced loran[D]. [Ph. D. dissertation], Czech Technical University, 2014.
- [6] ZELTSER M J and EL-ARINI M B. The impact of cross-rate interference on LORAN-C receivers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1985, AES-21(1): 36-46. doi: 10.1109/TAES.1985.310536.
- [7] ŠAFÁŘ J, WILLIAMS P, and VEJRAŽKA F. Accuracy performance of E-Loran receivers under cross-rate interference conditions[J]. *Annual of Navigation*, 2012, 19(1): 133-148. doi: 10.2478/v10367-012-0011-y.
- [8] 杨致友. 罗兰导航数学方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社,

- 1991.
- YANG Zhiyou. Mathematical Method of Loran Navigation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1991.
- [9] 温芳茹. 南海罗兰C台链远海工作还地波传播修正模型的初步确定[J]. 电子学报, 1991, 19(3): 1-8. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1991.03.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1991.03.001).
- WEN Fangru. The tentative determination of correction model of groundwave propagation in remote sea working zone of South China sea Loran-C chain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1991, 19(3): 1-8. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1991.03.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1991.03.001).
- [10] 温芳茹. 罗兰C台链地波传播修正模型及实验确定[J]. 电子学报, 1993, 21(9): 34-40. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1993.09.006](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1993.09.006).
- WEN Fangru. The correction model of groundwave propagation of Loran-C chain and its experimental determination[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1993, 21(9): 34-40. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1993.09.006](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1993.09.006).
- [11] 徐永亮. 罗兰-C接收机数据解调及定位解算技术研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院国家授时中心, 2009.
- XU Yongliang. Research on data demodulation and positioning calculation technology of Loran-C receiver[D]. [Master dissertation], Graduate University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2009.
- [12] 国家技术监督局. GB/T 14379-1993 罗兰C系统通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- The State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T 14379-1993 Generic specification for loran-c system[S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.
- [13] 赵当丽. 长河二号导航系统时间同步及授时的研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2003.
- ZHAO Dangli. Study on time synchronization and time service with "Changhe 2" navigation system[D]. [Master dissertation], National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [14] The United Kingdom Hydrographic Office Creator. Admiralty List of Radio Signals[M]. Taunton: The United Kingdom Hydrographic Office, 2017.
- [15] 海航. 罗兰-C使用手册[M]. 南京: 东南大学出版社, 1996: 11-19.
- HAI Hang. Loran-C Manual[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1996: 11-19.
- 刘时尧: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为无线电导航与授时技术.
- 张首刚: 男, 1966年生, 博士, 研究员, 研究方向为原子钟及其导航应用技术.
- 华宇: 男, 1974年生, 博士, 研究员, 研究方向为无线电导航与授时技术.

责任编辑: 马秀强