



# 无人机抗干扰技术综述 沟通

Tong Liu(B) , Jiaqi Huang, Jianming Guo, and Yongzhi Shan

中国北方工业集团航空弹药研究所,北京,中国 liutongsasa@hotmail.com

**摘要:**现代战争是海陆空电五位一体的联合作战,信息武器已成为重要的作战力量。无人机数据链作为无人机系统的神经中枢,是连接无人机与其他信息系统、指挥控制系统、武器系统等的信息桥梁,是实现信息通信、互操作等联合作战的手段。近年来,多场涉及无人机的军事行动表明,无人机数据链可大大缩短侦察、控制、打击和评估时间,成为提高战斗力的重要手段。目前,随着无人机在各国军事行动中的广泛应用,无人系统逐渐从辅助作战装备发展为主战装备,各国也在发展反无人机手段。无人机数据链面临着频谱资源短缺、频谱环境复杂、环境干扰严重、人为干扰等诸多挑战,对其安全性、可靠性和复杂环境下的适应性提出了更高的要求。

**关键词:**无人机 数据链 抗干扰技术

## 1 简介

当今战场电磁环境极其复杂,通信干扰设备发展迅速。例如EC2130罗盘呼通信电子战机载干扰系统工作频率可达1GHz,功率可达5~10kW,可压制敌方指挥控制网和防空网;美军“狼群”系统主要针对跳频、低功耗、网络化通信系统,工作频段为20MHz~2.5GHz,采用小型低功耗、分布式设备,通过内部组网技术破坏敌方通信网络。采用接近、包围作战目标的分布式体制,获得战术功率和探测灵敏度的优势,各分布式干扰点通过内部组网获得战术射频的优势。因此,要充分发挥数据链的作用,必须进一步提高数据链的抗干扰能力。

无人机数据链的设计比其他无线通信系统的设计要复杂得多,在抗干扰方面无人机面临着信息长距离传输造成的路径损耗、传输路径障碍物的衰减、无人机高速运动时多普勒频移以及复杂频谱环境中的干扰和阻碍等挑战。

### 1.1 A 链路长距离路径损耗

无人机数据链系统最严峻的挑战是信息的长距离传输,这将给数据链系统的性能带来以下挑战:

(1)功率衰减与频谱效率降低。IEEE802.11 (又称Wi-Fi)的无线传输链路只能覆盖100m,而后来发展起来的IEEE802.16 (又称WiMAX)在农村可以覆盖3km,在城区可以覆盖1km。上述覆盖范围也适用于3GPP LTE。通用航空数据链路需要360km的覆盖范围,利用这些传统的无线通信链路实现长距离的测控和传输会造成严重的功率衰减和极低的频谱效率。文献[8]表明,WiMAX网络在0.9km的范围内可以达到3bps~5bps/Hz的频谱效率。对于长距离传输,频谱效率会更低。

(2)传输时延。长距离的信息传输也会造成来回传输时间的严重延迟,这将大大增加通信保护时隙。相比WiMAX网络在5公里范围内最小时延17 $\mu$ s,单向传输360公里需要1.2ms。

(3)另外,信息的长距离传输会增大系统的误码率,降低接收端的信噪比,增大丢包的概率。

### 1.2 无人机平台的高速运动

无人机的高速运动会给接收机带来多普勒频移,而多普勒频移的大小与运动速度成正比,与波长成反比。可以计算出L-DACS1在600km/h、1164MHz时的多普勒频移为1213Hz,而WiMAX在100km/h、2.5GHz时的多普勒频移为231.5Hz。由于电磁波的频率与波长成反比,因此对于高速运动的无人机来说,工作频段越低,多普勒频移就会越小。然而低频段的频谱资源非常紧张,因此无人机高速运动带来的多普勒频移对无人机数据链是一个巨大的挑战。

### 1.3 链路障碍导致的衰减

无人机数据链应用的主要频段为微波(300MHz~3000 GHz),因为微波链路具有更高的可用带宽,但微波

频率高,波长很短,没有绕射作用,链路的这一特性带来了以下通信挑战:

- (1)阴影衰落。无人机数据链在通信过程中遇到的障碍物会部分或全部遮挡信号传输,造成严重的阴影衰落。
- (2)多径衰落。从较小尺度上看,由于电磁波穿过障碍物发生散射和反射,接收端从不同路径接收到同一信号的不同副本的不同相位,从而造成无线信号的多径衰落。由于无人机数据链路是动态变化的,副本之间的相位差也是动态变化的,因此在传统静态无线通信中不可能通过增加衰落开销来消除多径衰落。
- (3)另外,多径衰落将造成严重的符号干扰。

#### 1.4 人为的非恶意干扰与恶意干扰

非恶意干扰是指频谱环境中其他设备的无线电信号对无人机数据链造成的干扰。此类干扰叠加在通信信道中传输的信号上,使原信号发生畸变,导致信息错误或丢失。例如,在不同频率的电路中产生相同或相近频率的信号时,就会产生互调干扰。恶意干扰主要存在于军事领域,主要有分压型干扰和欺骗型干扰。

- (1)抑制干扰是指干扰器持续发射的干扰信号功率大于无人机数据链信号功率的一种人为通信干扰,使数据链中的通信节点不能正确接收射频信号,导致通信链路中断。根据干扰信号的形式,钳位干扰可分为单频干扰、窄带干扰和宽带干扰三种类型。由于钳位干扰功率淹没了有用信号或阻塞了射频前端,其调制信息无关紧要。

- (2)对欺骗信号的干扰采用与无人机数据链信号结构相似的欺骗信号,这样就无法检测出诱导接收机跟踪捕获的欺骗信号,从而达到降低其抗干扰能力的目的,而且可以采用与数据链信号近似的功率,避免功率过大而被检测到并降低成本。在实际应用中,如军事领域,接收机往往面临着高动态、弱信号、强干扰或信号遮挡等复杂多变的环境,这时接收机就会失去对欺骗信号的锁定捕获或者在跟踪过程中欺骗信号的影响增大,整个系统都会受到影响。

#### 1.5 拥挤的频谱环境

由于频谱资源紧张,不可避免地受到外界干扰信号的威胁。传统无人机数据链采用HF、VHF和SATCOM频段,

但SATCOM频段并不能保证每一个数据传输阶段都能使用, HF和VHF越来越拥挤。在我国, 按照工信部发布的无人机频率使用要求, 可使用的频段为: 840.5 MHz~845 MHz, 1 430 MHz~1 444 MHz和2 408 MHz~2 440 MHz。由于频谱资源短缺, 不可避免地受到外界干扰信号的威胁, 现代无人机作战环境和作战任务越来越复杂, 传统的抗干扰方法已不能保证无人机数据链通信的高效性和可靠性, 迫切需要在有限频谱资源下提高无人机数据链在复杂电磁环境下的抗干扰能力。

综上所述, 利用无人机实施集群作战, 战场环境复杂, 数据链通信面临敌方远程精确火力打击、战场电磁干扰压制和战场电磁兼容等多重威胁, 要使无人机能在复杂战场环境下实现集群抗干扰通信, 要求无人机数据链系统具备以下能力:

- (1) 广泛的频谱管理和分配能力: 可以在任何区域、任何时间将可用的频谱资源动态分配给无人机;
- (2) 能够解决长距离通信带来的大规模功率衰减问题

传递信息;

- (3) 规避和避免非恶意干扰的能力;
- (4) 抗恶意干扰的能力: 一方面要具备较强的反侦察能力, 通过隐藏信号波形、控制发射功率、控制传输方向等技术手段, 降低敌方侦察系统截获无人机数据链系统信号的概率; 另一方面, 在系统研制过程中, 应充分采用强干扰抑制、抗干扰调制和自适应滤波等技术, 提高复杂条件下无人机数据链系统的抗强通信能力, 有效应对打靶、拦阻等各种干扰方式。

- (5) 网络生存性: 数据链系统应具有良好的网络拓扑结构和路由协议设计, 当关键传输网络节点瘫痪造成战斗扑救或网络攻击时, 信息网络能根据无人机飞行位置与地面控制站位的关系, 自动调整信息通信节点, 优化数据链信息传输路线, 实现对抗密存条件下的通信;
- (6) 敌我识别能力: 在复杂的对抗环境下, 敌方可能利用电磁干扰和压制, 同时利用网络入侵、发送虚假指令等方式对无人机进行远程绑架和控制, 因此应在无人机数据链系统中加强敌我识别功能, 防止虚假地面站冒充我方地面控制部队获取无人机的控制权, 或冒充我方空中编队作战部队, 从而破坏和干扰我方编队预定的作战计划。

## 2 抗干扰技术（方式与原理）

未来战场电磁环境十分恶劣,信息化战争形势极其复杂,抗干扰能力的难点在于如何确定干扰频谱以及如何采用策略进行抑制。为提高无人机数据链设备的抗干扰能力,需要解决多种无线信号干扰、信号特征暴露、保密性差等问题。采用多维度综合抗干扰、抗截获、抗探测手段,实现多维度抗强干扰信息传输与分发,应对未来复杂电磁战场环境,提高无人机数据链信息传输的可靠性和持久性。

目前,无人机数据链采用了多种抗干扰技术,主要包括信道编码技术、扩频技术等,而多输入多输出(MIMO)技术、正交频分复用(OFDM)技术、自适应天线技术以及认知无线电(CR)技术的出现,也将为无人机数据链抗干扰能力的提高,提供有力的技术保障。

### 2.1 信道编码技术

由于干扰或其他原因,数据链路中数据传输时会出现误码,使接收机接收到的遥控指令、遥测参数或图像出现错误。根据香农的信道编码理论,只要信息的传输速率低于信道容量,总能找到一种信道编码方法,使错误概率任意小。

因此,通过信道编码对数据进行处理可以提高数据链路的抗干扰能力。

备选信道编码方法主要有卷积码、BCH码、RS码、交织码和级联码等。例如,美军的Link16数据链在信息段采用RS(31,16)编码,在每15bit信息段后增加一个16bit的监督段,可以检测和纠正8bit错误。当Link16数据链受到干扰时,Link16的误码率至少要达到0.45,才能使Link16不能检测和纠正误码,实现有效干扰。根据杨光等的仿真结果,在部分频带干扰条件下,采用RS编码和交织的调制系统与采用RS编码的调制系统和不采用编码的调制系统相比,具有更好的抗干扰性能,可以有效保证数据链消息传输的可靠性[1]。信道编码的复杂度越高,链路设备的处理时间越长。

因此,无人机数据链的信道编码设计应综合考虑无人机数据链的传输时延、抗干扰性能等要求。

### 2.2 扩频技术

扩频技术的基本原理是将发射信号扩展至一个很宽的频带,这个频带比带宽要宽得多

发射信息的带宽。通过接收端的相关接收,将信号恢复到信息带宽。基本原理可以表示为

$$C = B \log_2 1 + \frac{\text{单位}}{\text{否}} = B \log_2 1 + n_0 B \frac{\text{单位}}{\text{否}}$$

(1)

其中,N为噪声功率;S为信号平均功率;B为信号带宽;C为信道容量;N0为白噪声功率谱密度。提高信道容量C可以通过提高信噪比S/N或者增加信号带宽B来实现。但是信噪比S/N与信道容量C是成对的,因此增加信号带宽B更为有效。

扩频技术是美军数据链中广泛采用的抗干扰技术,根据扩频方式不同可分为直接序列扩频技术(DSSS)、跳频技术(FHSS)和跳时技术(THSS)。

2.2.1直接序列扩频技术DSSS系统的工作原理如图1所示。在信源端采用高比特率的

扩频码序列,对信源端进行频谱扩展,降低了数据链信号的功率谱密度,使敌方难以探测到,提高了抗干扰能力。在接收端采用同样的扩频码序列,干扰和噪声信号经过扩频码序列调制后,频谱展宽,功率谱密度降低,扩频信号解调后变成窄带信号,功率谱密度提高,系统的增益有几十倍的提高,也提高了系统的抗干扰能力。

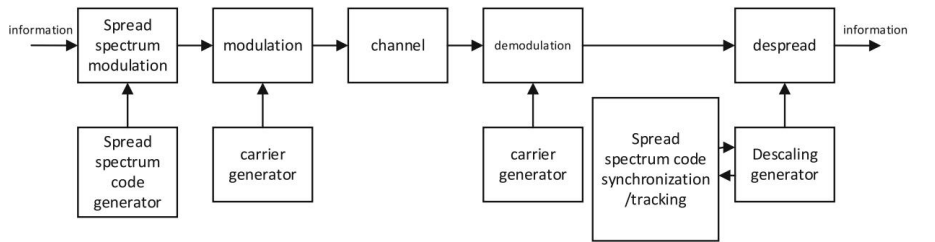


图1.直接序列扩频通信系统原理

2.2.2 跳频技术FHSS系统的工作原理如图2所示,在发端采用

扩频码序列信号进行频移键控调制,使载波频率不断跳变,在接收端采用扩频码序列进行信号恢复。在时间域上,FH信号是

多频移键控信号。在频域上,跳频信号在很宽的频带内以不等间隔跳变。与固定频率信号相比,只要敌方不清楚载波跳频的规律,就很难截取我方的通信内容,即使某些频点被敌方干扰,仍可以在其他未被干扰的频点上进行正常通信,具有良好的抗干扰能力。

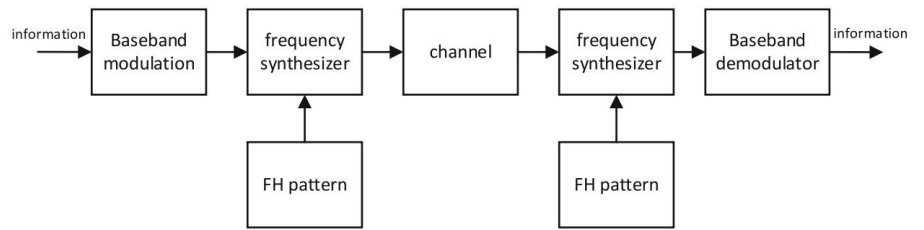


图2跳频通信系统工作原理

2.2.3 跳时技术THSS 就是使发射信

号在时间轴上进行跳变,时间轴可以分为很多个时间片,一帧内到底在哪个时间片上发射信号是由扩频序列来控制的,图3是 THSS 系统的基本框图。

在发端处输入数据先进行存储,由扩频码发生器的扩频码序列控制通断开关,经二相或四相调制后,经射频调制后发送出去。在接收端,射频接收机输出的中频信号由本地产生与发端相同的扩频码序列控制,经二相或四相解调器重新定时后送入数据存储器并输出数据。只要接收端与发端在时间上严格同步,就能够正确恢复出原始数据。由于单纯的跳时方法抗干扰不强,所以通常与其他方法相结合使用。

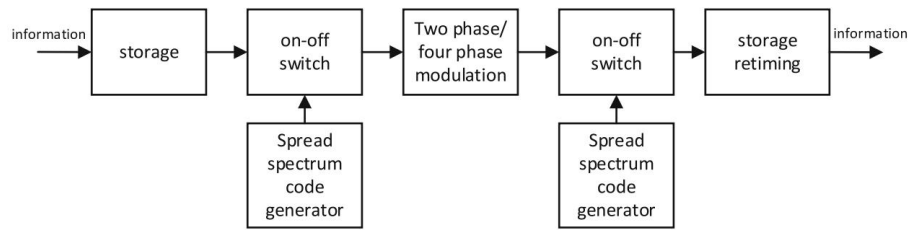


图3.跳时扩频系统原理

### 2.2.4 组合技术数据链在使用扩频技术

时,通常采用几种扩频方式的组合,例如美国的Link16数据链就采用了直接序列扩频、跳频和跳时的组合技术,并且CCSK码直接扩频序列具有良好的自相关性能。

它以每秒77000次的速率在969MHz~1206MHz之间跳变51个频点,每个脉冲符号改变一次载波频率。但每个脉冲的信号持续时间只有前6.4 $\mu$ s,跳变时延高达2.4585ms [2]。这种组合技术增加了同步技术的难度。既要完成跳频图案的同步,又要完成扩频序列的同步,并且在了解扩频码序列特性的情况下,通过阻断非相干PN码扩频干扰的模数干扰,可以对扩频通信系统进行有效的干扰[3],这导致了现行扩频通信的缺陷,因此,有必要研制出更优的扩频序列。

## 2.3 多输入多输出技术

MIMO技术是近年来兴起的一项重要通信技术,受到广泛关注。它是指信号在发射端通过多根天线发射,在接收端通过多根天线接收的无线通信技术。MIMO技术与OFDM、空时编码相结合,可以实现空间分集、时间分集和频率分集,可以实现空域、时域和频域的抗干扰。但如何将MIMO技术应用到数据链的抗干扰技术中,还需要在天线配置、功率分配、信号检测等方面进行研究。

## 2.4 正交频分复用技术

OFDM技术将信道划分为若干个正交的子信道,将高速数据信号转换成并行的低速子数据流,然后调制到子信道上传输。在接收端采用相关技术可以分离正交信号,以减少子信道间的相互干扰。每个子信道上的信号带宽小于信号的相关带宽,则每个子信道可以看作是平坦衰落的,从而消除符号间干扰。

## 2.5 自适应天线技术

目前无人机数据链抗干扰多采用定向天线技术,定向天线是指在某一个或某几个特定方向上发射和接收的电磁波特别强,而在其他方向上发射机接收的电磁波为0或极小,其目的



通过抑制干扰信号的接收,可以实现抗干扰的效果。

天线波束越窄,隐蔽性越强,抗干扰能力越强。

自适应天线技术利用相控阵天线的原理,对来自各个方向的波束进行空间滤波,它通过对天线阵元激励的调整,优化天线阵面方向图,利用数字信号处理技术对干扰信号进行处理和识别,在干扰源方向上形成零波束,抑制方向外的接收,减少了干扰,同时减少了电磁环境污染。扩频技术与自适应天线技术的结合是美国军用卫星通信系统抗干扰的主要手段。

自适应天线的缺点是在零点方向形成盲区,影响该区域用户的正常使用。

## 2.6 认知无线电技术

JM伊托拉提出认知无线电的概念,他认为认知无线电是一种智能化的无线通信系统,通过对无线电环境的感知和主动学习,实时改变通信系统的工作参数,如编码和调制方式、工作频率和发射功率,动态检测以及利用空闲频谱,以适应外界无线电环境的变化。

无人机数据链可以利用认知无线电技术监测通信频率干扰,根据干扰信号的特征,实时改变数据链的信道编码方式、扩频码序列、跳频模式、跳变方式、功率配置、天线模型等参数,合理利用无线频谱资源,提高信息传输能力和抗干扰能力。

# 3 无人机数据链抗干扰技术

应用于无人机数据链的抗干扰技术主要分为三类:提高系统可靠性和效能的相关技术、基于协作通信技术的抗干扰技术、基于认知无线电的抗干扰技术。

## 3.1 提高通信可靠性和有效性

这些相关技术包括多输入多输出(MIMO)系统的性能评估[4, 5]、信息传输策略[6, 7]以及利用蜂窝系统和其他无线通信系统[8, 9]。物理层和链路层的技术研究重点如下:

- (1)低功耗MIMO系统集成。
- (2)以扩频、跳频技术为代表的抗干扰技术的研究与使用。

- (3)高吞吐量、高性能的物理层和MAC层协议及策略  
有限频谱资源下的可靠性。
- (4)无人机数据链系统、卫星通信系统等集成  
无线通信系统。

### 3.2 基于协作通信

文献[10]提出了一种在  
仿真结果表明,该方案降低了误码率  
接收信号的速率。在动态传输速率条件下,该方案的传输可靠性较高。多源协作的研究

通信为无人机数据链多链路协同信息传输指明了方向。文献[10]和[11]提出了异步

基于协作通信的协作信息传输,以及  
从物理层增强信息传输的可靠性(构建  
三维空间异步协作传输模式)和链路层(通过  
多链路协作转发协议)充分利用了  
物理层采用三种空间分集技术,提高了分集增益,大大提高了抗干扰能力。后者可以消除

基于链路随机同步竞争窗口的单发多收和引导响应算法对短时链路变化的影响

层,获得更好的网络到达率和能量效率,增强传输  
可靠性,提高抗干扰能力。文献[12]提出了一种继电器  
接收机与发射机发生相对移动或信道状态信息过期时协作通信信道选择方法

环境变化很快。选择最佳的中继可以抵抗干扰  
在一定程度上提高了协作通信系统的可靠性。文献[13]提出了一种  
基于MAP准则的信道状态信息预测技术,提高  
协作通信系统的抗干扰能力。

### 3.3 基于认知无线电

此外,为了解决无人机广泛使用带来的频谱资源短缺和频谱管理难度加大的问题,认知

研究无人机频谱感知与系统重构的无线电技术。  
文献[14]提出了一种结合支持向量机的预测与评估方法  
无人机数据链在地理环境、气象环境、环境质量等复杂环境下受干扰程度的机器和功率准则

电磁环境等,预测结果可为无人机数据链改造提供参考。在分析当前无人机数据链存在问题的基础上,  
文献[15]提出了无人机智能数据链的概念和内涵  
基于认知无线电,描述了其工作原理,给出了指标体系及  
无人机智能数据链功能分类。基于无人机数据链功能  
提出了无人机智能数据链的体系结构。文献[16]提出  
一种基于状态机的无人机数据链多参数规划方法  
为无人机数据链重构提供了一种可行、有效的思路。

## 参考

1. 杨刚,周建,罗平:部分频率下JTIDS数据链性能分析  
频带干扰。J. Natl. Univ. Defense Technol. 32, 122–126 (2010)
2. 尹莉, 闫建军, 范勇. Link-16战术数据链抗干扰性能评估与仿真. 火力指挥控制, 2009, 34 (70–75)
3. 王平, 王志军, 孙绍军. 美军联合战术信息分发系统通信干扰研究. 舰船电子对抗. 29, 3–5 (2006)
4. Gans, MJ 等:通过 MIMO 通信增强无人驾驶汽车的连接性。IN:2013 IEEE 第 78 届车辆技术会议 (VTC 秋季),第 1-5 页 (2013 年)。https://doi.org/10.1109/VTCFall.2013.6692190
5. Su, W.,Matyjas, JD,Gans, MJ,Batalama, S.:任意排列线性收发器天线阵列时,机载 MIMO 通信可实现的最大容量。IEEE无线通讯汇刊12(11), 5584–5593 (2013)。https://doi.org/10.1109/TWC.2013.101.613.121746
6. Li, J.,Zhou, Y.,Lamont, L.:无人驾驶飞行器联网通信架构和协议。2013 IEEE GlobecomWorkshops (GCWkshps),第 1415-1420 页 (2013 年)。https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2013.6825193 7. Cheng, BN,Charland, R., Christensen, P.,Veytser, L. 和 Wheeler, J.:评估采用异构无线电技术的多跳  
机载 IP 主干网。IEEE Trans. Mob. Comput. 13(2),299–310 (2014)。https://doi.org/10.1109/TMC.2012.250
8. Gomez, K.,Rasheed, T.,Reynaud, L.,Kandeeban, S.:论空中 LTE 基站在公共安全和紧急恢复方面的性能。2013 年 IEEE Globecom 研讨会 (GC Wkshps),第 1391-1396 页 (2013 年)。https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2013.6825189 9. Yanmaz, E.,Kuschig, R.,Bettstetter, C.:基于 802.11a 的无人机到地面链路的信道测量。2011 年 IEEE GLOBECOM 研讨会 (GC Wkshps),第 1280-1284 页 (2011 年)。https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2011.6162389 10. Ribeiro, A.,Wang, R.,Giannakis, GB:具有完全分集频谱效率和可控复杂度的多源合作。见: 2006 年 IEEE 第 7 届无线通信信号处理进展研讨会,第 1-5 页 (2006 年)。https://doi.org/10.1109/SPAWC.2006.346422
11. Ribeiro, A.,Sidiropoulos, ND,Giannakis, GB,Yu, Y.:通过用户合作实现无线网络中的有线随机接入吞吐量。IEEE 信息理论 汇刊53(2),732–758 (2007)。https://doi.org/10.1109/TIT.2006.889718
12. Fer, L., Gao, Q., Zhang, J. 等:协作通信系统中带有过时信道状态信息的中继选择。IET Commun. 7, 1557–1565 (2013)
13. Fer, L., Zhang, J., Gao, Q. 等:解码转发协作通信系统中过时信道状态信息下的中断最优中继策略。IET Commun. 9, 441–450 (2015)
14. 张伟, 丁伟, 刘晨. 复杂杂环环境下无人机数据链干扰效应预测测试方法. 系统工程与电气技术, 38, 760–766 (2016)
15. 陈哲, 陶建, 范建: 无人机智能数据链路架构. 无线电气工程. 39, 4–6 (2009)
16. 何文倩, 丁文睿, 李春晖:基于状态机的UAS数据链多参数规划方法,2015年工业信息学国际会议 - 计算技术、智能技术、工业信息集成,第 156–159 页 (2015 年)。https://doi.org/10.1109/IIICII.2015.122