

## 复杂环境下的 UWB 精确定位技术研究

张东生 何东林 王振飞

山东正元冶达环境科技有限公司, 山东 济南 250101

**[摘要]**近年来, 矿山工业的快速发展对定位技术提出了更高的要求, 尤其是在矿山井下复杂且具有挑战性的环境中。实时而精准的位置信息对于确保矿工安全、提高生产效率以及优化资源利用至关重要。超宽带 (Ultra-Wideband, UWB) 定位技术由于其高精度、高带宽和良好的穿透性等特点, 逐渐成为矿山井下定位的研究热点。

**[关键词]**精确定位; 矿山井下; 超宽带技术

DOI: 10.33142/sca.v7i2.11266

中图分类号: TP391

文献标识码: A

### Research on UWB Precise Positioning Technology in Complex Environments

ZHANG Dongsheng, HE Donglin, WANG Zhenfei

Shandong Zhengyuan Yeda Environmental Technology Co., Ltd., Ji'nan, Shandong, 250101, China

**Abstract:** In recent years, the rapid development of the mining industry has put forward higher demands for positioning technology, especially in complex and challenging environments underground. Real time and accurate location information is crucial for ensuring the safety of miners, improving production efficiency, and optimizing resource utilization. Ultra-Wideband (UWB) positioning technology has gradually become a research hotspot in underground mining due to its high accuracy, high bandwidth, and good penetration.

**Keywords:** accurate positioning; underground mining; Ultra-Wideband technology

传统的定位技术在矿山井下环境中常常受到地质结构、设备干扰以及非视距等复杂条件的制约, 难以满足高精度、高稳定性的需求。UWB 技术作为一种新兴的无线定位技术, 以其超宽的频谱和短脉冲特性, 在复杂环境下表现出色。然而, 要将 UWB 技术在矿山井下应用得当, 需要深入研究其在地质多变、设备密集的矿山环境中的性能和挑战。

#### 1 UWB 技术在井下定位的需求和应用前景

在矿山井下环境中, 精准的位置信息对于确保矿工的安全、提高生产效率以及有效管理资源至关重要。UWB 技术因其高精度、低延迟和强大的抗干扰性而成为井下定位的理想选择。矿山井下环境高度复杂, 传统的定位技术在这种情况下可能受到多路径效应和信号衰减的影响, 导致精度不足。而 UWB 技术的超宽带信号能够有效穿透地质层, 其独特的频谱特性使得在复杂的地下环境中能够实现高精度的定位。UWB 技术支持时间差测距原理, 通过测量信号传播的时间差来计算节点之间的距离, 从而实现定位。在井下环境中, 具有较高的准确性, 尤其是在需要考虑矿石、岩层等不均匀介质的情况下。UWB 技术还支持多天线系统的设计, 通过多路径效应的抑制和对信号的多方向感知, 进一步提高了定位系统的精度和可靠性, 对于矿山井下环境中存在的隧道、洞穴等特殊地形有着重要意义。

#### 2 UWB 技术基础

##### 2.1 超宽带信号在矿山井下的传播特性

###### 2.1.1 信号穿透性与穿透深度

在矿山井下环境中, UWB 技术的信号穿透性与穿透深

度是至关重要的因素, 直接影响定位系统的性能, 穿透深度则表示信号能够深入地质层的程度, 决定了定位系统对于深埋地下目标的感知范围。UWB 信号的穿透性与穿透深度受到信号频率和地质层介质特性的影响。信号频率较低的 UWB 信号通常具有更好的穿透性, 能够穿越多种地质层, 包括土壤和矿石。其穿透深度可以通过以下公式描述:

$$D = \frac{c}{2f}$$

其中,  $D$  表示穿透深度,  $c$  是光速,  $f$  是 UWB 信号的频率。通过调整信号频率, 可以在保证信号穿透性的同时, 优化穿透深度, 满足不同井下环境的需求。在考虑地质层介质特性时, 各种岩石和土壤的介电常数和导电率不同, 会影响信号的传播特性, 通过研究介质特性的复杂度, 可以使用传输线理论等方法建立更准确的信号传播模型, 进一步优化信号穿透性和穿透深度。

###### 2.1.2 信号在矿石中的传播模型

信号在矿石中传播的模型需要考虑介质的电磁特性、多路径效应以及可能存在的散射和吸收。对于信号在矿石中的传播模型, 可以采用弗雷涅尔传播模型 (Fresnel Zone) 来描述。该模型考虑了信号的直射路径、一次反射路径、二次反射路径等多个路径的贡献。弗雷涅尔传播模型的近似表达式为:

$$R = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}$$

其中,  $R$  为路径长度,  $d_1$  和  $d_2$  分别为直射

路径和一次反射路径的长度。这个模型考虑了路径长度的影响，有助于理解信号在矿石中的传播情况。另一个常用的模型是雷利衰落模型，用于描述多径传播中不同路径上信号强度的变化。其表达式为： $P(d) = p_0 \cdot e^{-\frac{d}{d_0}}$  其中  $P(d)$  表示距离为  $d$  处的信号强度， $p_0$  是参与距离出的信号强度， $d_0$  是衰落系数。通过这个模型，可以更好地理解信号在矿石中的衰减规律。需要强调的是，由于矿石的异质性和复杂性，实际的信号传播往往受到多种因素的影响，例如矿石的含水量、颗粒大小等。因此，建立准确的信号传播模型需要结合实测数据和仿真方法，以更好地适应具体的矿山环境。

## 2.2 UWB 通信系统设计

### 2.2.1 井下通信系统需求

在矿山井下环境中，井下通信系统直接关系到矿工的安全和工作效率。首先，井下通信系统需要具备广泛的覆盖范围，确保在矿山深部和隧道等复杂地形中也能保持稳定的通信连接，对于及时传递关键信息、应对紧急状况至关重要。矿山作业通常需要实时监测和迅速响应，因此通信系统的数据传输速率必须足够高，同时延迟要足够低以确保及时的信息交互，可以通过提高信号的传输速度和优化数据处理算法来实现。矿山环境可能存在各种干扰源，包括电磁干扰、地下杂音等，通信系统需要具备强大的抗干扰能力，以确保信号的稳定传输，可以通过采用频谱扩频技术、错误纠正编码等方法来增强系统的稳定性。井下通信系统需要考虑到矿山环境的特殊性，如湿度、尘埃等因素。因此，设备的防水、防尘性能也是系统设计的重要考虑因素。此外，系统的能耗也需要优化，以确保在矿工长时间工作的情况下保持设备的稳定运行。

### 2.2.2 适应井下环境的发射端和接收端设计

发射端的设计需要考虑到井下环境的潮湿和尘埃，采取防水和防尘措施，以确保设备的长期稳定运行。合适的密封设计和材料选择是关键因素，防止湿度渗透和尘埃进入设备内部。此外，发射端需要具备高抗干扰性，采用频谱扩频等技术来应对可能存在的电磁干扰，确保信号传输的稳定性。天线设计是关键的一环，以确保在复杂地质结构中接收到稳定且强度充足的信号。接收端的电路设计需要考虑功耗优化，确保设备在井下环境中能够长时间工作而不需要频繁地充电或更换电池，可通过使用低功耗电子元件和优化电源管理系统来实现。采用先进的调制解调技术、错误纠正编码等手段，提高信号的传输效率和可靠性。同时，多路径效应在井下环境中常常存在，因此，信号处理算法需要具备一定的多路径抑制能力，以确保定位和通信系统的准确性。

### 2.2.3 信号处理方法

有效的信号处理方法能够提高系统的抗干扰性、降低

误码率，同时满足高带宽、低延迟的通信需求。在发射端，通过对要传输的数据进行调制，将其转化为适合传输的信号，可以采用各种调制方式，如二进制相移键控 (BPSK) 或正交幅度调制 (QAM)，以提高信号的传输效率。而在接收端，解调则将接收到的信号还原为原始数据。这种方法有助于在有限的频谱内传输更多的信息。通过将信号在频谱上扩展，使其在特定频率范围内更为分散，减小了受到干扰的概率，可以通过使用伪随机码序列对信号进行扩频，提高系统的稳定性。在处理井下通信中可能存在的多路径效应时，可以通过使用自适应滤波器或使用融合多个接收天线的技术来实现，有助于减小多路径引起的信号失真，提高接收信号的准确性。纠错编码也是信号处理，通过在发送端添加冗余信息，接收端可以检测并纠正由于传输过程中可能引入的错误，有助于提高通信系统对于噪声和干扰的容忍度，确保数据的可靠传输。在整个信号处理过程中，为了降低通信的延迟，可以采用快速算法和并行处理技术，以提高信号处理的效率。

## 2.3 UWB 定位原理

### 2.3.1 时间差测距原理在井下环境的应用

在井下定位中，时间差测距原理是一种常用的技术，通过测量信号在不同节点之间的传播时间差来实现定位。该原理可由以下公式表示：

其中， $d = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t$   $d$  是节点之间的距离， $c$  是信号的

传播速度， $\Delta t$  是节点之间的时间差。在井下环境中，地质层的复杂性可能引入多路径效应和信号衰减，因此，修正后的公式考虑了这些因素： $d = \frac{1}{2} c \cdot (\Delta t + \delta t)$  这里， $\delta t$  表示通过建模多路径效应得到的修正项，用于校正时间差的误差，有助于提高井下定位的准确性，更好地适应复杂的地质环境。

### 2.3.2 井下定位中的多天线系统设计

多天线系统在井下定位中扮演关键角色，其设计需要充分考虑地质环境的复杂性。信号的相位差测量是多天线系统的基础，其公式为： $\phi = \arctan\left(\frac{\text{Imag}(S)}{\text{Real}(S)}\right)$  其中， $\phi$  表示信号的相位差， $\text{Imag}(S)$  和  $\text{Real}(S)$  分别为信号的虚部和实部。通过测量多个天线间的相位差，可以获得关于方向的信息，从而提高定位的精度。在井下环境中，多路径效应和地质结构的影响可能引入额外的相位差，因此，系统设计需要考虑这些因素，采用先进的多路径抑制算法，提高系统的稳定性和精度。

## 3 井下复杂地质环境挑战

### 3.1 地层多变性与定位精度

地下岩层、矿石和其他地质结构的多样性导致了信号

传播的不确定性和复杂性,不同的地质组成和介质特性会对超宽带信号的传播产生不同影响,使得定位系统难以对地下环境进行准确建模,导致信号的多径效应、衰减和散射等现象,从而影响定位系统的测距准确性和位置解算的可靠性。地层的多变性也增加了定位算法的复杂性,需要综合考虑不同地质情况下的信号传播特性,以提高定位系统在复杂矿山井下环境中的适应能力。

### 3.2 井下设备和结构物的影响

巷道、支护结构、采矿设备等,它们对超宽带信号的传播和反射产生复杂的影响,导致信号的多径效应和反射增强,不仅使得定位系统难以准确识别和定位目标,还可能引起信号衰减和失真,降低定位系统的精度和可靠性。井下设备和结构物的阻挡、遮挡等影响因素也使得定位系统在实际应用中需要更加精细地调整和优化,以克服这些难以预测和控制的环境干扰。

### 3.3 井下非视距定位问题

在矿山井下环境中,由于地下空间的限制和地质结构的复杂性,定位系统经常面临目标与定位节点之间无法直接建立视线联系的情况。这种非视距条件下的定位问题使得传统的视距依赖型定位方法面临困境,因为无法直接通过测量视距来实现目标的精确定位。非视距引入了额外的不确定性,可能导致定位系统的误差和不稳定性增加,尤其是在需要高精度和实时性的矿山作业环境中。因此,如何有效应对非视距环境下的定位问题成为矿山井下定位技术研究的一个重要方向。

## 4 UWB 定位算法优化

### 4.1 井下时间差测距算法改进

在矿山井下环境中,复杂地质结构和非视距等挑战时间差测距算法精度问题。地下环境中的信号多径效应和散射现象对时间差测距算法的精度造成影响,可能引起测距误差,尤其是在对矿山定位有高精度要求的场景中。井下环境的异质性和非均匀介质可能导致信号传播速度的变化。传统的时间差测距算法通常基于恒定的信号传播速度假设,因此需要更准确地对不均匀介质下的速度变化进行建模,可以通过引入速度变化的函数来描述:

$$v(t) = v_0 + \frac{dv}{dt}t \text{ 其中, } v(t) \text{ 是时刻 } t \text{ 的信号传播速度, } v_0 \text{ 是初始速度, } \frac{dv}{dt} \text{ 表示速度随时间的变化率。}$$

多路径效应可能导致接收到多个信号,从而使得测距结果不稳定且难以准确解算。多路径效应可以通过引入多径衰落系数  $K$  进行修正:  $P(d) = p_0 \cdot e^{-Kd}$

其中,  $P(d)$  表示距离为  $d$  处的信号强度,  $p_0$  是参考距离处的信号强度,  $K$  是多径衰落系数。总之,井下时间差测距算法的改进需要考虑地下环境的复杂性,通过引入更先进的信号处理技术、改进的信号传播模型以及对多

路径效应和速度变化的更精确建模,可以有效提高井下时间差测距算法的精度和可靠性,以满足矿山定位的高要求。

### 4.2 井下非视距定位算法优化

在矿山井下环境中,由于井下环境的特殊性,包括地下结构的复杂性和限制视线的地形,传统的视距依赖型定位方法在非视距条件下面临一系列挑战。在非视距环境中,目标位置的信号可能通过不同路径到达接收节点,导致信号相位差异和强度变化。对于问题,可以引入多径修正项,例如使用 Rice 分布来模拟多路径效应:

$$P(d) + p_0 \cdot e^{-\frac{(d-d_0)^2}{2\sigma^2}} \text{ 其中, } P(d) \text{ 表示距离为 } d \text{ 处的信号强度, } P_0 \text{ 表示距离为 } d \text{ 处的信号强度, } P_0 \text{ 是参考距离处的信号强度, } d_0 \text{ 是参考距离, } \sigma \text{ 是 Rice 分布的尺度参数。}$$

其次,考虑到非视距定位中常常无法直接测量视距,可以借助先进的测量技术,如超宽带 (UWB) 信号,以提高信号的穿透性和适应性。UWB 信号可以在非视距环境中更好地穿透障碍物,提供更可靠的测距信息。测距模型可以使用以下公式:  $D = \frac{t_{\text{tof}}}{2}$  其中,  $D$  表示距离,  $t_{\text{tof}}$  是飞行时间。

最后,非视距定位算法的优化还需考虑地质结构对信号传播的影响。引入地质介质的特性,如介电常数和导电率,对信号传播进行更准确的建模,以提高非视距环境下的定位精度。综合以上考虑,通过引入多路径修正、采用适应性强的 UWB 信号以及更准确的地质介质建模,可以有效优化井下非视距定位算法,提高其精度和鲁棒性,适应复杂的矿山井下环境。

### 4.3 抗干扰算法在井下的应用

在矿山井下环境中,由于电磁干扰、地下杂音等因素的存在,导致定位系统的误差和不稳定性,因此需要采用先进的抗干扰算法以确保定位系统在井下环境中的可靠性。一种常见的抗干扰算法是频谱扩频技术。通过将信号在频谱上进行扩展,使其在频率上更分散,减小了受到干扰的概率,可以通过引入伪随机码序列对信号进行扩频,提高系统的稳定性。频谱扩频技术的数学表达式为:

$$S_{\text{spread}}(t) = S(t) \cdot c(t) \text{ 其中, } S_{\text{spread}}(t) \text{ 表示扩频后的信号, } S(t) \text{ 是原始信号, } C(t) \text{ 是伪随机码序列。}$$

另一种常见的抗干扰算法是采用差分信号处理技术。通过对接收到的信号进行差分运算,可以抑制掉部分共模干扰,提高信号的抗干扰能力。差分信号处理的表达式为:  $V_{\text{diff}}(t) = V_{\text{in1}}(t) - V_{\text{in2}}(t)$  其中,  $V_{\text{diff}}(t)$  表示差分信号,  $V_{\text{in1}}(t)$  和  $V_{\text{in2}}(t)$  分别是两个输入信号。此外,采用自适应滤波器也是抗干扰的有效手段。自适应滤波器可以根据实时的环境条件调整滤波器的参

数,以适应不同干扰水平。自适应滤波器的数学表达式为: $y(n) = w^T(n) \cdot x(n)$  其中,  $y(n)$  是滤波器的输出,  $w^T(n)$  是自适应滤波器的权重向量,  $x(n)$  是输入信号向量。总之,抗干扰算法在井下定位系统中的应用可以通过采用频谱扩频技术、差分信号处理和自适应滤波器等手段来提高系统的稳定性和鲁棒性,确保在面对各种干扰源时依然能够提供可靠的定位服务。

## 5 结语

通过对矿山井下环境中 UWB 精确定位技术的研究,探讨了其在解决复杂地质环境下的定位难题方面的潜力。从地层多变性到非视距定位,我们指出了技术面临的关键挑战,并提出了创新性的解决方案。期望我们的研究为矿山工业提供更安全、高效的定位解决方案,同时为 UWB 技术在其他领域的应用提供有益的启示。在未来,我们将持续努力,推动技术的实际应用,为工业定位领域的不断进步

贡献力量。

## [参考文献]

- [1]陈燕. 基于 UWB 的高精度室内三维定位技术研究[D]. 北京: 电子科技大学, 2018.
  - [2]姚健,刘送永,崔玉明,等. 基于 KF/PF 测距滤波的 UWB 精确定位试验研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(9): 122-126.
  - [3]李伟杰,戴亚文,唐雨等. 基于 UWB 的地铁隧道定位系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(8): 198-201.
  - [4]董军,王伟权,夏天文. 煤矿井下人员超宽带定位的联合解算方法[J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33(3): 464-469.
  - [5]戚群涛,赫佳星,崔丽珍等. 煤矿井下基于新息理论的 AKF 超宽带定位算法[J]. 内蒙古科技大学学报, 2023, 42(3): 227-231.
- 作者简介: 张东生(1980.12—), 工程师, 学历: 本科, 专业: 水工环灾。