



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106908780 A

(43)申请公布日 2017.06.30

(21)申请号 201710155640.3

(22)申请日 2017.03.16

(71)申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

(72)发明人 徐立新 摆冬冬 陈佳文 苏鑫 陈玉龙

(74)专利代理机构 北京理工正阳知识产权代理事务所(普通合伙) 11639

代理人 毛燕

(51)Int.Cl.

G01S 13/10(2006.01)

H04L 27/26(2006.01)

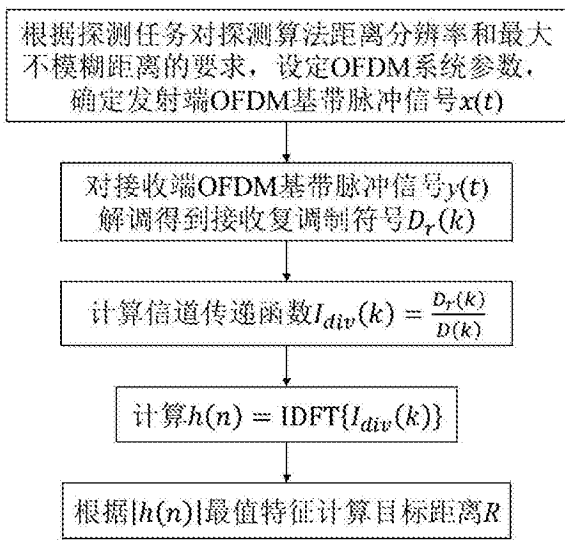
权利要求书4页 说明书9页 附图3页

(54)发明名称

基于OFDM的无线电近感探测方法及探测智能化方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于OFDM的无线电近感探测方法及探测智能化方法,尤其涉及应用于无线电近感探测器目标距离估计的方法,属于无线电近感探测领域。本发明的一种基于OFDM的无线电近感探测方法,能够实现无线电近感探测器的目标距离估计,具有下述优点:(1)不需要附加额外的硬件实现探测子系统和通信子系统集成,有效减小无线电近感探测器的尺寸、重量和功耗;(2)距离估算过程与具体发射数据无关,发射数据具有随机性因此不易被干扰机识别,提高无线电近感探测器的抗干扰性能。本发明还公开一种基于OFDM的无线电近感探测智能化方法,基于OFDM的无线电近感探测方法实现无线电近感探测器目标距离估计的基础上,还能够提高无线电近感探测器的智能化水平。



1. 一种基于OFDM的无线电近感探测方法,其特征在于:包括如下步骤:

步骤(1),根据无线电近感探测器所执行探测任务对探测算法距离分辨率 ΔR 和最大不模糊距离 R_{MUTR} 的要求,按照公式(1)和公式(2)所示关系,预先设定OFDM系统参数和发射复调制符号 $D(k)$,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$;

$$\Delta R = \frac{c}{2N\Delta f} \quad (1)$$

$$R_{MUTR} = \frac{c}{2\Delta f} \text{ 且 } R_{MUTR} > R_{\max} \quad (2)$$

其中: R_{\max} 为无线电近感探测器所执行探测任务的最大探测距离,所述预先设定的OFDM系统参数包括:OFDM基带信号子载波个数 N 、子载波频率间隔 Δf 以及循环前缀长度 T_g ,其中子载波频率间隔 Δf 必须满足 $\Delta f \gg f_d$, $f_d = 2v_{\text{rel}}f_c/c$ 为目标相对运动产生的多普勒频移, v_{rel} 为目标相对运动速度, f_c 为载波频率,循环前缀长度 T_g 必须满足 $T_g \gg 2R_{\max}/c$;

所述无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 的表达式如式(3)所示:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D(k) \exp(j2\pi f_k t), \quad 0 < t < T \quad (3)$$

其中, $f_k = k\Delta f$ 为第 k 个子载波频率, $T = 1/\Delta f$ 为基本OFDM符号持续时间、不计入循环前缀长度 T_g ;

步骤(2),根据步骤(1)中无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$,得到经目标反射到达无线电近感探测器接收端的OFDM基带脉冲信号 $y(t)$,对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$;

所述接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 和接收复调制符号 $D_r(k)$ 的表达式如式(4)所示:

$$\begin{cases} y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D_r(k) \exp(j2\pi f_k t) \\ D_r(k) = D(k) \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{\text{sym}}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, R 为目标距离,当载波频率 f_c 远大于子载波频率间隔 Δf 时,各个子载波的多普勒频移近似相等, $T_{\text{sym}} = T + T_g$ 为包含循环前缀长度的OFDM符号持续时间,接收复调制符号 $D_r(k)$ 包含了目标距离 R 和相对运动引起的全部失真信息;

步骤(3),根据步骤(1)中发射复调制符号 $D(k)$ 和步骤(2)中接收复调制符号 $D_r(k)$,计算信道传递函数 $I_{\text{div}}(k)$;

所述信道传递函数 $I_{\text{div}}(k)$ 的计算公式如式(5)所示:

$$I_{\text{div}}(k) = \frac{D_r(k)}{D(k)} = \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{\text{sym}}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

上述信道传递函数 $I_{\text{div}}(k)$ 的计算公式中通过运算消去了发射复调制符号 $D(k)$,即距离估算过程与具体发射数据无关,由于发射数据具有随机性因此不易被干扰机识别,从而提高无线电近感探测器抗干扰能力;

步骤(4),根据步骤(3)中信道传递函数 $I_{div}(k)$ 计算 $h(n)$;

所述 $h(n)$ 通过对信道传递函数 $I_{div}(k)$ 进行离散傅里叶逆变换(IDFT)得到, $h(n)$ 的计算公式为:

$$h(n) = \frac{\sin \pi l(n)}{\sin \frac{\pi}{N} l(n)} \exp \left[j \pi l(n) \frac{(N-1)}{N} - j 2 \pi f_d T_{sym} \right], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

其中, $l(n) = n - 2N \Delta f R / c$;

步骤(5),根据步骤(4)中 $h(n)$ 计算目标距离 R ,即实现无线电近感探测器的目标距离估计;

所述目标距离 R 的计算公式如式(7)所示:

$$R = \frac{cn}{2N\Delta f} \quad (7)$$

其中, n 为所述步骤(4)得到的 $h(n)$ 的模取最大值时所对应的 n 值。

2.一种基于OFDM的无线电近感探测方法,其特征在于:根据无线电近感探测器所执行探测任务对探测算法距离分辨率 ΔR 和最大不模糊距离 R_{MUTR} 的要求,预先设定OFDM系统参数和发射复调制符号 $D(k)$,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$;无线电近感探测器接收经目标反射的回波信号,对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$;利用发射复调制符号 $D(k)$ 和接收复调制符号 $D_r(k)$ 计算信道传递函数 $I_{div}(k)$;对信道传递函数 $I_{div}(k)$ 进行IDFT变换得到 $h(n)$;由 $h(n)$ 的模取最大值时所对应的 n 值计算目标距离,实现无线电近感探测器目标距离估计的目的。

3.一种基于OFDM的无线电近感探测智能化方法,其特征在于:包括如下步骤,

步骤1,根据无线电近感探测器所执行探测任务选择探测模式或通信模式;

步骤2,根据步骤1所选择的探测模式或通信模式实现相应的通信功能或探测功能;

步骤2.1,实现基于OFDM的无线电近感探测功能;

步骤(1),根据无线电近感探测器所执行探测任务对探测算法距离分辨率 ΔR 和最大不模糊距离 R_{MUTR} 的要求,按照公式(1)和公式(2)所示关系,预先设定OFDM系统参数和发射复调制符号 $D(k)$,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$;

$$\Delta R = \frac{c}{2N\Delta f} \quad (1)$$

$$R_{MUTR} = \frac{c}{2\Delta f} \text{且} R_{MUTR} > R_{max} \quad (2)$$

其中 R_{max} 为无线电近感探测器所执行探测任务的最大探测距离,所述预先设定的OFDM系统参数包括:OFDM基带信号子载波个数 N 、子载波频率间隔 Δf 以及循环前缀长度 T_g ,其中子载波频率间隔 Δf 必须满足 $\Delta f \gg f_d$, $f_d = 2v_{rel}f_c/c$ 为目标相对运动产生的多普勒频移, v_{rel} 为目标相对运动速度, f_c 为载波频率,循环前缀长度 T_g 必须满足 $T_g \gg 2R_{max}/c$;

所述无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 的表达式如式(3)所示:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D(k) \exp(j2\pi f_k t), \quad 0 < t < T \quad (3)$$

其中, $f_k = k \Delta f$ 为第 k 个子载波频率, $T = 1 / \Delta f$ 为基本 OFDM 符号持续时间、不计入循环前缀长度 T_g ;

步骤 (2), 根据步骤 (1) 中无线电近感探测器发射端 OFDM 基带脉冲信号 $x(t)$, 得到经目标反射到达无线电近感探测器接收端的 OFDM 基带脉冲信号 $y(t)$, 对接收端 OFDM 基带脉冲信号 $y(t)$ 进行 OFDM 解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$;

所述接收端 OFDM 基带脉冲信号 $y(t)$ 和接收复调制符号 $D_r(k)$ 的表达式如式 (4) 所示:

$$\begin{cases} y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D_r(k) \exp(j2\pi f_k t) \\ D_r(k) = D(k) \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{sym}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, R 为目标距离, 当载波频率 f_c 远大于子载波频率间隔 Δf 时, 各个子载波的多普勒频移近似相等, $T_{sym} = T + T_g$ 为包含循环前缀长度的 OFDM 符号持续时间, 接收复调制符号 $D_r(k)$ 包含了目标距离 R 和相对运动引起的全部失真信息;

步骤 (3), 根据步骤 (1) 中发射复调制符号 $D(k)$ 和步骤 (2) 中接收复调制符号 $D_r(k)$, 计算信道传递函数 $I_{div}(k)$;

所述信道传递函数 $I_{div}(k)$ 的计算公式如式 (5) 所示:

$$I_{div}(k) = \frac{D_r(k)}{D(k)} = \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{sym}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

上述信道传递函数 $I_{div}(k)$ 的计算公式中通过运算消去了发射复调制符号 $D(k)$, 即距离估算过程与具体发射数据无关, 由于发射数据具有随机性因此不易被干扰机识别, 从而提高无线电近感探测器抗干扰能力;

步骤 (4), 根据步骤 (3) 中信道传递函数 $I_{div}(k)$ 计算 $h(n)$;

所述 $h(n)$ 通过对信道传递函数 $I_{div}(k)$ 进行离散傅里叶逆变换 (IDFT) 得到, $h(n)$ 的计算公式为:

$$h(n) = \frac{\sin \pi l(n)}{\sin \frac{\pi}{N} l(n)} \exp\left[j\pi l(n) \frac{(N-1)}{N} - j2\pi f_d T_{sym}\right], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

其中, $l(n) = n - 2N \Delta f R / c$;

步骤 (5), 根据步骤 (4) 中 $h(n)$ 计算目标距离 R , 即实现无线电近感探测器的目标距离估计;

所述目标距离 R 的计算公式如式 (7) 所示:

$$R = \frac{cn}{2N\Delta f} \quad (7)$$

其中, n 为所述步骤 (4) 得到的 $h(n)$ 的模取最大值时所对应的 n 值;

步骤 2.2, 实现基于 OFDM 的无线电近感探测器通信功能;

步骤 3, 根据无线电近感探测器所执行探测任务需要, 重复步骤 1、步骤 2, 利用探测功能获取目标距离信息, 利用通信功能将探测到的目标距离信息以及自身状态信息等数据进行传输, 实现无线电近感探测器与探测网络中其他探测节点之间的协同工作, 直至完成探测

任务。

4. 根据权利要求3所述的一种基于OFDM的无线电近感探测智能化方法,其特征在于:步骤2.2具体实现方法为,

步骤(1),根据无线电近感探测器所执行探测任务以及无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议选择通信功能中的发送数据子功能或接收数据子功能;

步骤(2),根据步骤(1)的选择结果实现相应的发送数据子功能或接收数据子功能;

步骤1),实现基于OFDM的无线电近感探测器通信功能中的发送数据子功能;

步骤i,将无线电近感探测器探测到的目标距离信息以及自身状态信息等原始数据按无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议进行编码得到发射复调制符号 $D(k)$;

步骤ii,根据无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议,预先设定OFDM系统参数,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$;

步骤2),实现基于OFDM的无线电近感探测器通信功能中的接收数据子功能;

步骤i,按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议,对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$;

步骤ii,对接收复调制符号 $D_r(k)$ 按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议进行解码得到探测网络其他探测节点传输的数据。

5. 根据权利要求4所述的一种基于OFDM的无线电近感探测智能化方法,其特征在于:所述无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议为现有技术中的无线通信协议;优选通信协议为802.11a。

6. 一种基于OFDM的无线电近感探测智能化方法,其特征在于:根据无线电近感探测器所执行探测任务选择探测模式或通信模式;当选择探测模式时,根据无线电近感探测器所执行探测任务对探测算法距离分辨率 ΔR 和最大不模糊距离 R_{MUTR} 的要求,预先设定OFDM系统参数和发射复调制符号 $D(k)$,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$;无线电近感探测器接收经目标反射的回波信号,对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$;利用发射复调制符号 $D(k)$ 和接收复调制符号 $D_r(k)$ 计算信道传递函数 $I_{div}(k)$;对信道传递函数 $I_{div}(k)$ 进行IDFT变换得到 $h(n)$;由 $h(n)$ 的模取最大值时所对应的 n 值计算目标距离;当选择通信模式时,先进行发送数据还是接收数据判断;当选择发送数据时,将探测到的目标距离信息以及自身状态信息等原始数据按无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议进行编码得到发射复调制符号 $D(k)$,根据无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议,预先设定OFDM系统参数,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$;当选择接收数据时,按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议,对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$,对接收复调制符号 $D_r(k)$ 按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议进行解码得到探测网络其他节点传输的数据;根据所执行探测任务需要重复探测模式或通信模式,利用探测功能获取目标距离信息,利用通信功能将探测到的目标距离信息以及自身状态信息等数据进行传输,直至完成所执行探测任务。

基于OFDM的无线电近感探测方法及探测智能化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于OFDM的无线电近感探测方法及探测智能化方法,尤其涉及一种应用于无线电近感探测器目标距离估计的方法,属于无线电近感探测领域。

背景技术

[0002] 传统无线电近感探测器是利用电磁波环境信息感知目标,在距目标最佳作用点处输出启动信号的一种装置或系统,其基本作用是发射电磁波、接收目标回波,并利用各种信号处理手段求解目标距离信息。随着科技进步和时代发展,防务平台面临新的挑战,特别是导引一体化与智能弹药的发展趋势要求未来无线电近感探测器不仅要具备基本的探测功能,还需要有一定的通信功能,而线性调频连续波(Linear Frequency Modulated Continuous Wave,LFMCW)等传统意义上的无线电近感探测体制难以满足这一要求。

[0003] 另一方面,在无线电近感探测器中加入单独的通信子系统势必会增大无线电近感探测器的体积、重量和功耗。相比之下,对通信相关技术加以研究作为无线电近感探测器目标距离估计方法更具优势,这样,无线电近感探测器不再需要单独的通信子系统,完全由软件决定执行探测功能或通信功能。为实现探测和通信一体化,关键是无线电近感探测器的发射基带信号波形设计和从目标回波信号中提取距离信息的方法。OFDM具有频谱利用率高,抗多径效应,系统参数选择灵活,可采用离散傅里叶变换对实现快速调制与解调等特点,已经广泛应用于数字音/视频广播、无线局域网以及第四代移动通信系统中。已有学者研究OFDM在雷达领域的应用,但由于无线电近感探测器的作用距离较近,交会时间窗口短,与普通雷达工作所面对的远距离情况有所不同。无线电近感探测器对探测算法除了在距离分辨率、抗干扰等方面有严格要求外,必须要易于实现,现有基于OFDM的雷达探测方法难以满足这一要求。

发明内容

[0004] 针对现有技术中无线电近感探测方法存在的下述不足:(1)现有基于LFMCW的无线电近感探测方法不具备通信功能,不能满足无线电近感探测器网络化和智能化发展的通信要求;(2)无线电近感探测器的作用距离较近,交会时间窗口短,与普通雷达工作所面对的远距离情况有所不同,无线电近感探测器对探测算法除了在距离分辨率、抗干扰等方面有严格要求外,探测算法还必须要易于实现,现有基于OFDM的雷达探测方法难以满足上述要求。本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法要解决的技术问题是实现无线电近感探测器的目标距离估计,同时具有下述优点:(1)无线电近感探测器不需要附加额外的硬件组成来实现通信功能,实现探测子和通信子系统集成,同时有效减小无线电近感探测器的尺寸、重量和功耗;(2)距离估算过程与具体发射数据无关,发射数据具有随机性因此不易被干扰机识别,提高无线电近感探测器的抗干扰性能。

[0005] 本发明还公开一种基于OFDM的无线电近感探测智能化方法,在本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法实现无线电近感探测器目标距离估计的基础上,还能够提

高无线电近感探测器的智能化水平,保持无线电近感探测器硬件平台不变,在无线电近感探测器的信号处理算法模块中增加工作模式选择功能,通过软件编程选择探测模式或通信模式来实现相应的探测功能或通信功能,无线电近感探测器不需要附加额外的硬件组成来实现通信功能,实现探测子系统和通信子系统一体化;无线电近感探测器重复选择探测模式或通信模式,利用探测功能获取目标距离信息,利用通信功能将探测到的目标距离信息以及自身状态信息等数据进行传输,实现无线电近感探测器与探测网络中其他探测节点之间的协同工作,达到提高无线电近感探测器智能化水平的目的。

[0006] 本发明的目的是通过下述技术方案实现的:

[0007] 本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法,根据无线电近感探测器所执行探测任务对探测算法距离分辨率 ΔR 和最大不模糊距离 R_{MUTR} 的要求,预先设定OFDM系统参数和发射复调制符号 $D(k)$,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$;无线电近感探测器接收经目标反射的回波信号,对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$;利用发射复调制符号 $D(k)$ 和接收复调制符号 $D_r(k)$ 计算信道传递函数 $I_{div}(k)$;对信道传递函数 $I_{div}(k)$ 进行IDFT变换得到 $h(n)$;由 $h(n)$ 的模取最大值时对应的 n 值计算目标距离,实现无线电近感探测器目标距离估计的目的。

[0008] 本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤(1),根据无线电近感探测器所执行探测任务对探测算法距离分辨率 ΔR 和最大不模糊距离 R_{MUTR} 的要求,按照公式(1)和公式(2)所示关系,预先设定OFDM系统参数和发射复调制符号 $D(k)$,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 。

$$[0010] \quad \Delta R = \frac{c}{2N\Delta f} \quad (1)$$

$$[0011] \quad R_{MUTR} = \frac{c}{2\Delta f} \text{ 且 } R_{MUTR} > R_{\max} \quad (2)$$

[0012] 其中: R_{\max} 为无线电近感探测器所执行探测任务的最大探测距离,所述预先设定的OFDM系统参数包括:OFDM基带信号子载波个数 N 、子载波频率间隔 Δf 以及循环前缀长度 T_g ,其中子载波频率间隔 Δf 必须满足 $\Delta f \gg f_d$, $f_d = 2v_{rel}f_c/c$ 为目标相对运动产生的多普勒频移, v_{rel} 为目标相对运动速度, f_c 为载波频率,循环前缀长度 T_g 必须满足 $T_g \gg 2R_{\max}/c$ 。

[0013] 所述无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 的表达式如式(3)所示:

$$[0014] \quad x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D(k) \exp(j2\pi f_k t), \quad 0 < t < T \quad (3)$$

[0015] 其中, $f_k = k \Delta f$ 为第 k 个子载波频率, $T = 1/\Delta f$ 为基本OFDM符号持续时间、不计入循环前缀长度 T_g 。

[0016] 步骤(2),根据步骤(1)中无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$,得到经目标反射到达无线电近感探测器接收端的OFDM基带脉冲信号 $y(t)$,对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$ 。

[0017] 所述接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 和接收复调制符号 $D_r(k)$ 的表达式如式(4)所示:

$$[0018] \quad \begin{cases} y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D_r(k) \exp(j2\pi f_k t) \\ D_r(k) = D(k) \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{sym}) \end{cases} \quad (4)$$

[0019] 其中, R 为目标距离, 当载波频率 f_c 远大于子载波频率间隔 Δf 时, 各个子载波的多普勒频移近似相等, $T_{sym} = T + T_g$ 为包含循环前缀长度的 OFDM 符号持续时间, 接收复调制符号 $D_r(k)$ 包含了目标距离 R 和相对运动引起的全部失真信息。

[0020] 步骤 (3), 根据步骤 (1) 中发射复调制符号 $D(k)$ 和步骤 (2) 中接收复调制符号 $D_r(k)$, 计算信道传递函数 $I_{div}(k)$ 。

[0021] 所述信道传递函数 $I_{div}(k)$ 的计算公式如式 (5) 所示:

$$[0022] \quad I_{div}(k) = \frac{D_r(k)}{D(k)} = \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{sym}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

[0023] 上述信道传递函数 $I_{div}(k)$ 的计算公式中通过运算消去了发射复调制符号 $D(k)$, 即距离估算过程与具体发射数据无关, 由于发射数据具有随机性因此不易被干扰机识别, 从而提高无线电近感探测器抗干扰能力。

[0024] 步骤 (4), 根据步骤 (3) 中信道传递函数 $I_{div}(k)$ 计算 $h(n)$ 。

[0025] 所述 $h(n)$ 通过对信道传递函数 $I_{div}(k)$ 进行离散傅里叶逆变换 (IDFT) 得到, $h(n)$ 的计算公式为:

$$[0026] \quad h(n) = \frac{\sin \pi l(n)}{\sin \frac{\pi}{N} l(n)} \exp\left[j\pi l(n) \frac{(N-1)}{N} - j2\pi f_d T_{sym}\right], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

[0027] 其中, $l(n) = n - 2N \Delta f R / c$ 。

[0028] 步骤 (5), 根据步骤 (4) 中 $h(n)$ 计算目标距离 R , 即实现无线电近感探测器的目标距离估计。

[0029] 所述目标距离 R 的计算公式如式 (7) 所示:

$$[0030] \quad R = \frac{cn}{2N\Delta f} \quad (7)$$

[0031] 其中, n 为所述步骤 (4) 得到的 $h(n)$ 的模取最大值时所对应的 n 值。

[0032] 本发明还公开一种基于 OFDM 的无线电近感探测智能化方法, 在所述的一种基于 OFDM 的无线电近感探测方法实现无线电近感探测器目标距离估计的基础上, 还能够提高无线电近感探测器的智能化水平, 保持无线电近感探测器硬件平台不变, 在无线电近感探测器的信号处理算法模块中增加工作模式选择功能, 通过软件编程选择探测模式或通信模式来实现相应的探测功能或通信功能, 无线电近感探测器不需要附加额外的硬件组成来实现通信功能, 实现探测子系统和通信子系统一体化; 无线电近感探测器重复选择探测模式或通信模式, 利用探测功能获取目标距离信息, 利用通信功能将探测到的目标距离信息以及自身状态信息等数据进行传输, 实现无线电近感探测器与探测网络中其他探测节点之间的协同工作, 达到提高无线电近感探测器智能化水平的目的。

[0033] 本发明还公开的一种基于 OFDM 的无线电近感探测智能化方法, 根据无线电近感探

测器所执行探测任务选择探测模式或通信模式；当选择探测模式时，根据无线电近感探测器所执行探测任务对探测算法距离分辨率 ΔR 和最大不模糊距离 R_{MUTR} 的要求，预先设定 OFDM 系统参数和发射复调制符号 $D(k)$ ，确定无线电近感探测器发射端 OFDM 基带脉冲信号 $x(t)$ ；无线电近感探测器接收经目标反射的回波信号，对接收端 OFDM 基带脉冲信号 $y(t)$ 进行 OFDM 解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$ ；利用发射复调制符号 $D(k)$ 和接收复调制符号 $D_r(k)$ 计算信道传递函数 $I_{div}(k)$ ；对信道传递函数 $I_{div}(k)$ 进行 IDFT 变换得到 $h(n)$ ；由 $h(n)$ 的模取最大值时所对应的 n 值计算目标距离；当选择通信模式时，先进行发送数据还是接收数据判断；当选择发送数据时，将探测到的目标距离信息以及自身状态信息等原始数据按无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议进行编码得到发射复调制符号 $D(k)$ ，根据无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议，预先设定 OFDM 系统参数，确定无线电近感探测器发射端 OFDM 基带脉冲信号 $x(t)$ ；当选择接收数据时，按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议，对接收端 OFDM 基带脉冲信号 $y(t)$ 进行 OFDM 解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$ ，对接收复调制符号 $D_r(k)$ 按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议进行解码得到探测网络其他节点传输的数据；根据所执行探测任务需要重复探测模式或通信模式，直至完成所执行探测任务。

[0034] 本发明还公开的一种基于 OFDM 的无线电近感探测智能化方法，包括以下步骤：

[0035] 步骤 1，根据无线电近感探测器所执行探测任务选择探测模式或通信模式。

[0036] 步骤 2，根据步骤 1 所选择的探测模式或通信模式实现相应的通信功能或探测功能。

[0037] 步骤 2.1，实现基于 OFDM 的无线电近感探测功能。

[0038] 步骤 (1)，根据无线电近感探测器所执行探测任务对探测算法距离分辨率 ΔR 和最大不模糊距离 R_{MUTR} 的要求，按照公式 (1) 和公式 (2) 所示关系，预先设定 OFDM 系统参数和发射复调制符号 $D(k)$ ，确定无线电近感探测器发射端 OFDM 基带脉冲信号 $x(t)$ 。

$$[0039] \quad \Delta R = \frac{c}{2N\Delta f} \quad (1)$$

$$[0040] \quad R_{MUTR} = \frac{c}{2\Delta f} \text{ 且 } R_{MUTR} > R_{\max} \quad (2)$$

[0041] 其中 R_{\max} 为无线电近感探测器所执行探测任务的最大探测距离，所述预先设定的 OFDM 系统参数包括：OFDM 基带信号子载波个数 N 、子载波频率间隔 Δf 以及循环前缀长度 T_g ，其中子载波频率间隔 Δf 必须满足 $\Delta f \gg f_d$ ， $f_d = 2v_{rel}f_c/c$ 为目标相对运动产生的多普勒频移， v_{rel} 为目标相对运动速度， f_c 为载波频率，循环前缀长度 T_g 必须满足 $T_g \gg 2R_{\max}/c$ 。

[0042] 所述无线电近感探测器发射端 OFDM 基带脉冲信号 $x(t)$ 的表达式如式 (3) 所示：

$$[0043] \quad x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D(k) \exp(j2\pi f_k t), \quad 0 < t < T \quad (3)$$

[0044] 其中， $f_k = k \Delta f$ 为第 k 个子载波频率， $T = 1/\Delta f$ 为基本 OFDM 符号持续时间、不计入循环前缀长度 T_g 。

[0045] 步骤 (2)，根据步骤 (1) 中无线电近感探测器发射端 OFDM 基带脉冲信号 $x(t)$ ，得到经目标反射到达无线电近感探测器接收端的 OFDM 基带脉冲信号 $y(t)$ ，对接收端 OFDM 基带脉

冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$ 。

[0046] 所述接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 和接收复调制符号 $D_r(k)$ 的表达式如式(4)所示:

$$[0047] \begin{cases} y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D_r(k) \exp(j2\pi f_k t) \\ D_r(k) = D(k) \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{sym}) \end{cases} \quad (4)$$

[0048] 其中, R 为目标距离,当载波频率 f_c 远大于子载波频率间隔 Δf 时,各个子载波的多普勒频移近似相等, $T_{sym}=T+T_g$ 为包含循环前缀长度的OFDM符号持续时间,接收复调制符号 $D_r(k)$ 包含了目标距离 R 和相对运动引起的全部失真信息。

[0049] 步骤(3),根据步骤(1)中发射复调制符号 $D(k)$ 和步骤(2)中接收复调制符号 $D_r(k)$,计算信道传递函数 $I_{div}(k)$ 。

[0050] 所述信道传递函数 $I_{div}(k)$ 的计算公式如式(5)所示:

$$[0051] I_{div}(k) = \frac{D_r(k)}{D(k)} = \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{sym}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

[0052] 上述信道传递函数 $I_{div}(k)$ 的计算公式中通过运算消去了发射复调制符号 $D(k)$,即距离估算过程与具体发射数据无关,由于发射数据具有随机性因此不易被干扰机识别,从而提高无线电近感探测器抗干扰能力。

[0053] 步骤(4),根据步骤(3)中信道传递函数 $I_{div}(k)$ 计算 $h(n)$ 。

[0054] 所述 $h(n)$ 通过对信道传递函数 $I_{div}(k)$ 进行离散傅里叶逆变换(IDFT)得到, $h(n)$ 的计算公式为:

$$[0055] h(n) = \frac{\sin \pi l(n)}{\sin \frac{\pi}{N} l(n)} \exp\left[j\pi l(n) \frac{(N-1)}{N} - j2\pi f_d T_{sym}\right], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

[0056] 其中, $l(n) = n - 2N \Delta f R / c$ 。

[0057] 步骤(5),根据步骤(4)中 $h(n)$ 计算目标距离 R ,即实现无线电近感探测器的目标距离估计。

[0058] 所述目标距离 R 的计算公式如式(7)所示:

$$[0059] R = \frac{cn}{2N\Delta f} \quad (7)$$

[0060] 其中, n 为所述步骤(4)得到的 $h(n)$ 的模取最大值时所对应的 n 值。

[0061] 步骤2.2,实现基于OFDM的无线电近感探测器通信功能。

[0062] 步骤(1),根据无线电近感探测器所执行探测任务以及无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议选择通信功能中的发送数据子功能或接收数据子功能。

[0063] 所述无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议包括现有技术中的无线通信协议,如802.11a,也包括其他用户定制协议。

[0064] 步骤(2),根据步骤(1)的选择结果实现相应的发送数据子功能或接收数据子功能。

[0065] 步骤1),实现基于OFDM的无线电近感探测器通信功能中的发送数据子功能。

[0066] 步骤i,将无线电近感探测器探测到的目标距离信息以及自身状态信息等原始数据按无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议进行编码得到发射复调制符号 $D(k)$ 。

[0067] 步骤ii,根据无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议,预先设定OFDM系统参数,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 。

[0068] 步骤2),实现基于OFDM的无线电近感探测器通信功能中的接收数据子功能。

[0069] 步骤i,按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议,对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$ 。

[0070] 步骤ii,对接收复调制符号 $D_r(k)$ 按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议进行解码得到探测网络其他探测节点传输的数据。

[0071] 步骤3,根据无线电近感探测器所执行探测任务需要,重复步骤1、步骤2,利用探测功能获取目标距离信息,利用通信功能将探测到的目标距离信息以及自身状态信息等数据进行传输,实现无线电近感探测器与探测网络中其他探测节点之间的协同工作,直至完成探测任务。

[0072] 有益效果:

[0073] 1、本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法及探测智能化方法,针对LFMCW等传统意义上的无线电近感探测体制不具备通信功能,为提高无线电近感探测器智能化水平,相比在无线电近感探测器中加入单独的通信子系统,本发明将通信领域广泛使用的OFDM技术应用于无线电近感探测器目标距离估计,实现探测子系统和通信子系统一体化,这样,无线电近感探测器不再需要单独的通信子系统,完全由软件决定实现探测功能或通信功能。无线电近感探测器利用探测功能获取目标距离信息,利用通信功能将探测到的目标距离信息以及自身状态信息等数据进行传输,实现无线电近感探测器与探测网络中其他探测节点之间的协同工作,提高无线电近感探测器的智能化水平。同时,无线电近感探测器不需要附加额外的硬件组成来实现通信功能,能够有效减小无线电近感探测器的尺寸、重量和功耗。

[0074] 2、本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法,所述步骤(3)中信道传递函数 $I_{div}(k)$ 的计算公式通过运算消去了发射复调制符号 $D(k)$,即距离估算过程与具体发射数据无关,发射数据具有随机性因此不易被干扰机识别,从而提高无线电近感探测器的抗干扰性能。

附图说明

[0075] 图1为无线电近感探测器的系统框图,其中本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法及探测智能化方法通过对图1中的信号处理算法模块进行软件编程实现;

[0076] 图2为本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法的流程图;

[0077] 图3为本发明实施例1的仿真结果图;

[0078] 图4为本发明还公开的一种基于OFDM的无线电近感探测智能化方法的一种典型应用情景示意图,图中探测节点1至探测节点M组成一个探测网络,探测网络包含至少一个无线电近感探测器,其他探测节点可能为指挥控制平台、通信中继站等,探测网络各探测节点

间存在多条通信链路以协同工作；

[0079] 图5为本发明还公开的一种基于OFDM的无线电近感探测智能化方法的流程图。

具体实施方式

[0080] 下面结合附图和实施例对本发明内容做进一步说明，下述实施例以本发明所述技术方案为前提实施，给出了详细的实施方案和具体的操作过程，但本发明的保护范围不限于下述实施例。

[0081] 实施例1

[0082] 本实施例对本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法的技术方案和具体实施方式作出说明。以实现距离分辨率6m、30m内的探测任务为例，结合图2所示流程图，包括以下步骤：

[0083] 步骤(1)，根据无线电近感探测器所执行探测任务对探测算法距离分辨率 ΔR 和最大模糊距离 R_{MUTR} 的要求，按照公式(1)和公式(2)所示关系，预先设定OFDM系统参数和发射复调制符号 $D(k)$ ，确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 。

$$[0084] \quad \Delta R = \frac{c}{2N\Delta f} \quad (1)$$

$$[0085] \quad R_{MUTR} = \frac{c}{2\Delta f} \text{ 且 } R_{MUTR} > R_{\max} \quad (2)$$

[0086] 其中 $R_{\max}=30\text{m}$ 为无线电近感探测器所执行探测任务的最大探测距离，所述预先设定OFDM系统参数的计算结果为：OFDM基带信号子载波个数 $N=64$ 、子载波频率间隔 $\Delta f=390.625\text{KHz}$ 以及循环前缀长度 $T_g=0.64\mu\text{s}$ ，其中子载波频率间隔 $\Delta f=390.625\text{KHz}$ 满足 $\Delta f \gg f_d$ ， $f_d=2v_{\text{rel}}f_c/c \approx 1.83\text{KHz}$ 为目标相对运动产生的多普勒频移， $v_{\text{rel}}=50\text{m/s}$ 为目标相对运动速度， $f_c=5.5\text{GHz}$ 为载波频率，循环前缀长度 $T_g=0.64\mu\text{s}$ 满足 $T_g \gg 2R_{\max}/c$ ， $2R_{\max}/c=0.2\mu\text{s}$ 。

[0087] 所述无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 由图1中OFDM调制模块实现，发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 的表达式如式(3)所示：

$$[0088] \quad x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D(k) \exp(j2\pi f_k t), \quad 0 < t < T \quad (3)$$

[0089] 其中， $f_k=k\Delta f=390.625\text{kHz}$ 为第 k 个子载波频率， $T=1/\Delta f=2.56\mu\text{s}$ 为基本OFDM符号持续时间、不计入循环前缀长度 T_g 。

[0090] 所述步骤(1)中发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 由图1中的正交上变频模块合成载波、载波频率 $f_c=5.5\text{GHz}$ ，通过发射天线向空间辐射。

[0091] 步骤(2)，所述步骤(1)中无线电近感探测器的发射信号被目标反射，部分能量被无线电近感探测器的接收天线接收，经过图1中正交下变频模块后，得到接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ ，对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$ 。

[0092] 所述接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 和接收复调制符号 $D_r(k)$ 的表达式如式(4)所示：

$$[0093] \quad \begin{cases} y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} D_r(k) \exp(j2\pi f_k t) \\ D_r(k) = D(k) \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{sym}) \end{cases} \quad (4)$$

[0094] 其中, R 为目标距离, 载波频率 $f_c = 5.5\text{GHz}$ 和子载波频率间隔 $\Delta f = 390.625\text{KHz}$ 满足 $f_c \gg \Delta f$, 各个子载波的多普勒频移近似相等, $T_{sym} = T + T_g = 3.2\mu\text{s}$ 为包含循环前缀长度的 OFDM 符号持续时间, 接收复调制符号 $D_r(k)$ 包含了目标距离 R 和相对运动引起的全部失真信息。

[0095] 步骤 (3), 根据步骤 (1) 中发射复调制符号 $D(k)$ 和步骤 (2) 中接收复调制符号 $D_r(k)$, 计算信道传递函数 $I_{div}(k)$ 。

[0096] 所述信道传递函数 $I_{div}(k)$ 的计算公式如式 (5) 所示:

$$[0097] \quad I_{div}(k) = \frac{D_r(k)}{D(k)} = \exp\left(-j2\pi f_k \frac{2R}{c}\right) \exp(-j2\pi f_d T_{sym}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

[0098] 上述信道传递函数 $I_{div}(k)$ 的计算公式中通过运算消去了发射数据 $D(k)$, 即距离估算过程与具体发射数据无关, 由于发射数据具有随机性因此不易被干扰机识别, 提高无线电近感探测器抗干扰能力。

[0099] 步骤 (4), 根据步骤 (3) 中信道传递函数 $I_{div}(k)$ 计算 $h(n)$ 。

[0100] 所述 $h(n)$ 通过对信道传递函数 $I_{div}(k)$ 进行离散傅里叶逆变换 (IDFT) 得到, $h(n)$ 的计算公式为:

$$[0101] \quad h(n) = \frac{\sin \pi l(n)}{\sin \frac{\pi}{N} l(n)} \exp\left[j\pi l(n) \frac{(N-1)}{N} - j2\pi f_d T_{sym}\right], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

[0102] 其中, $l(n) = n - 2N \Delta f R / c$ 。

[0103] 步骤 (5), 根据步骤 (4) 中 $h(n)$ 计算目标距离 R , 即实现无线电近感探测器的目标距离估计。

[0104] 所述目标距离 R 的计算公式如式 (7) 所示:

$$[0105] \quad R = \frac{cn}{2N\Delta f} \quad (7)$$

[0106] 其中, n 为所述步骤 (4) 得到的 $h(n)$ 的模取最大值时所对应的 n 值。

[0107] 本实施例对应的仿真结果如图 3 所示, 仿真时选取了 7 个具有典型代表性的目标距离 R , 下面对图 3 所示仿真结果进行详细分析:

[0108] (1) $R = 6\text{m}$ 、 12m 、 18m 和 300m 这 4 个目标距离值小于最大不模糊距离 $R_{MUTR} = 384\text{m}$ 且是距离分辨率 $\Delta R = 6\text{m}$ 的整数倍, 从图 3 所示仿真结果可以看出, 本发明公开的探测算法能够按照既定距离分辨率准确区分出这 4 个目标距离值;

[0109] (2) $R = 960\text{m}$ 这一目标距离值虽然是距离分辨率 $\Delta R = 6\text{m}$ 的整数倍, 但它大于最大不模糊距离 $R_{MUTR} = 384\text{m}$, 因此在图 3 所示仿真结果中未被准确地分辨出来, 而是被“折回”检测为 $6 \times (960 \div 6 - 64 \times 2) = 192\text{m}$, 该结果符合最大不模糊距离 R_{MUTR} 的物理意义;

[0110] (3) $R = 60.6\text{m}$ 和 $R = 123\text{m}$ 这两个目标距离值虽然小于最大不模糊距离 $R_{MUTR} = 384\text{m}$,

但它们不是距离分辨率 $\Delta R=6\text{m}$ 的整数倍,因此在图3所示仿真结果中同样未被准确地分辨出来,二者分别被检测为 $6 \times 10=60\text{m}$ 和 $6 \times 20=120\text{m}$,该结果符合距离分辨率 ΔR 的物理意义。

[0111] 实施例2

[0112] 本实施例对本发明还公开的一种基于OFDM的无线电近感探测智能化方法的技术方案和具体实施方式作出说明,结合图4所示应用情景示意图和图5所示流程图,仍以实现距离分辨率6m、30m内的探测任务为例,包括以下步骤:

[0113] 步骤1,根据无线电近感探测器所执行探测任务选择探测模式或通信模式。

[0114] 步骤2,根据步骤1所选择的探测模式或通信模式实现相应的通信功能或探测功能。

[0115] 步骤2.1,实现基于OFDM的无线电近感探测功能。

[0116] 该步骤内容与实施例1相同,参见实施例1。

[0117] 步骤2.2,实现基于OFDM的无线电近感探测器通信功能。

[0118] 步骤(1),根据无线电近感探测器所执行探测任务以及无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议选择通信功能中的发送数据子功能或接收数据子功能。

[0119] 所述无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议包括现有技术中的无线通信协议,如802.11a,也包括其他用户定制协议。

[0120] 步骤(2),根据步骤(1)的选择结果实现相应的发送数据子功能或接收数据子功能。

[0121] 步骤1),实现基于OFDM的无线电近感探测器通信功能中的发送数据子功能。

[0122] 步骤i,将无线电近感探测器探测到的目标距离信息以及自身状态信息等原始数据按无线电近感探测器与所处探测网络约定好的通信协议进行编码得到发射复调制符号 $D(k)$ 。

[0123] 步骤ii,根据无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议,预先设定OFDM系统参数,确定无线电近感探测器发射端OFDM基带脉冲信号 $x(t)$ 。

[0124] 步骤2),实现基于OFDM的无线电近感探测器通信功能中的接收数据子功能。

[0125] 步骤i,按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议,对接收端OFDM基带脉冲信号 $y(t)$ 进行OFDM解调得到接收复调制符号 $D_r(k)$ 。

[0126] 步骤ii,对接收复调制符号 $D_r(k)$ 按照无线电近感探测器与所处探测网络之间约定好的通信协议进行解码得到探测网络其他探测节点传输的数据。

[0127] 步骤3,根据无线电近感探测器所执行探测任务需要,重复步骤1、步骤2,利用探测功能获取目标距离信息,利用通信功能将探测到的目标距离信息以及自身状态信息等数据进行传输,实现无线电近感探测器与探测网络中其他探测节点之间的协同工作,直至完成探测任务。

[0128] 以上结合具体实施例对本发明公开的一种基于OFDM的无线电近感探测方法及探测智能化方法的技术方案和具体实施方式作了说明,但这些说明不能被理解为限制了本发明的范围,这些仅是举例说明,可以对这些实施方式做出多种变更或修改,而不背离本发明的原理和实质。本发明的保护范围由随附的权利要求书限定,任何在本发明权利要求基础上的改动都是本发明的保护范围。

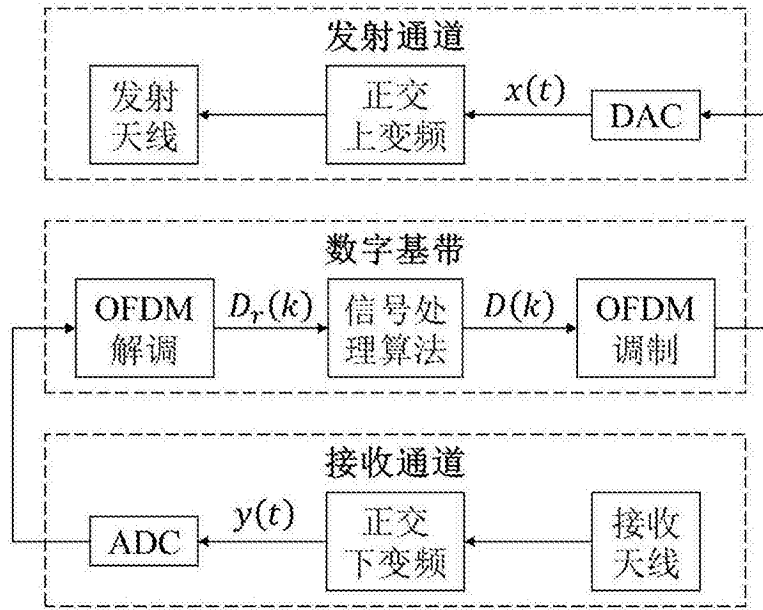


图1

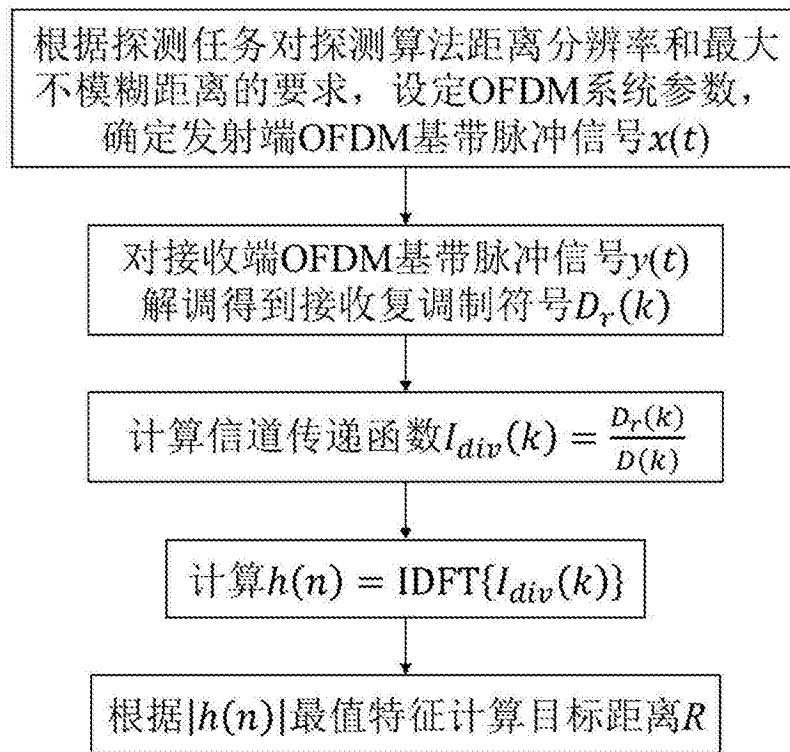


图2

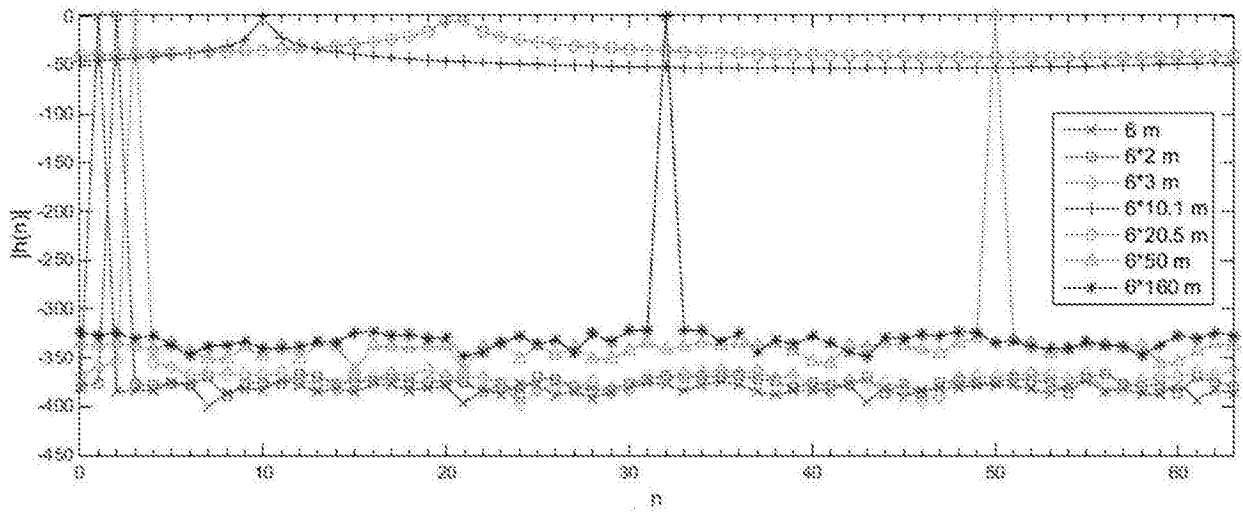


图3

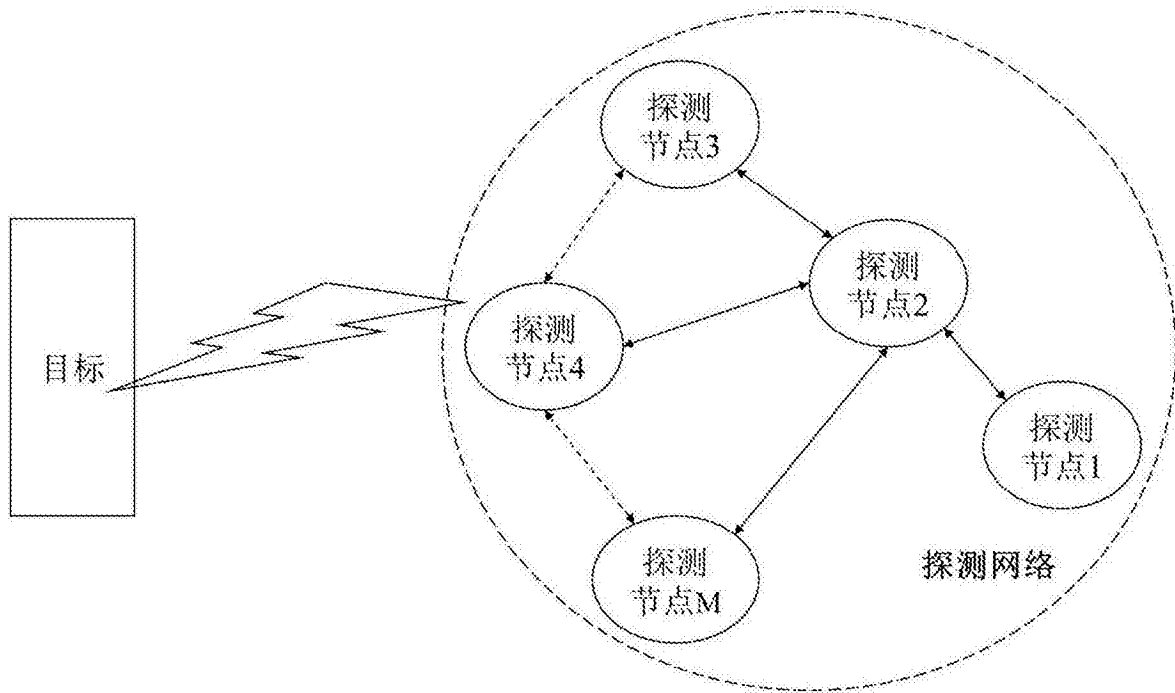


图4

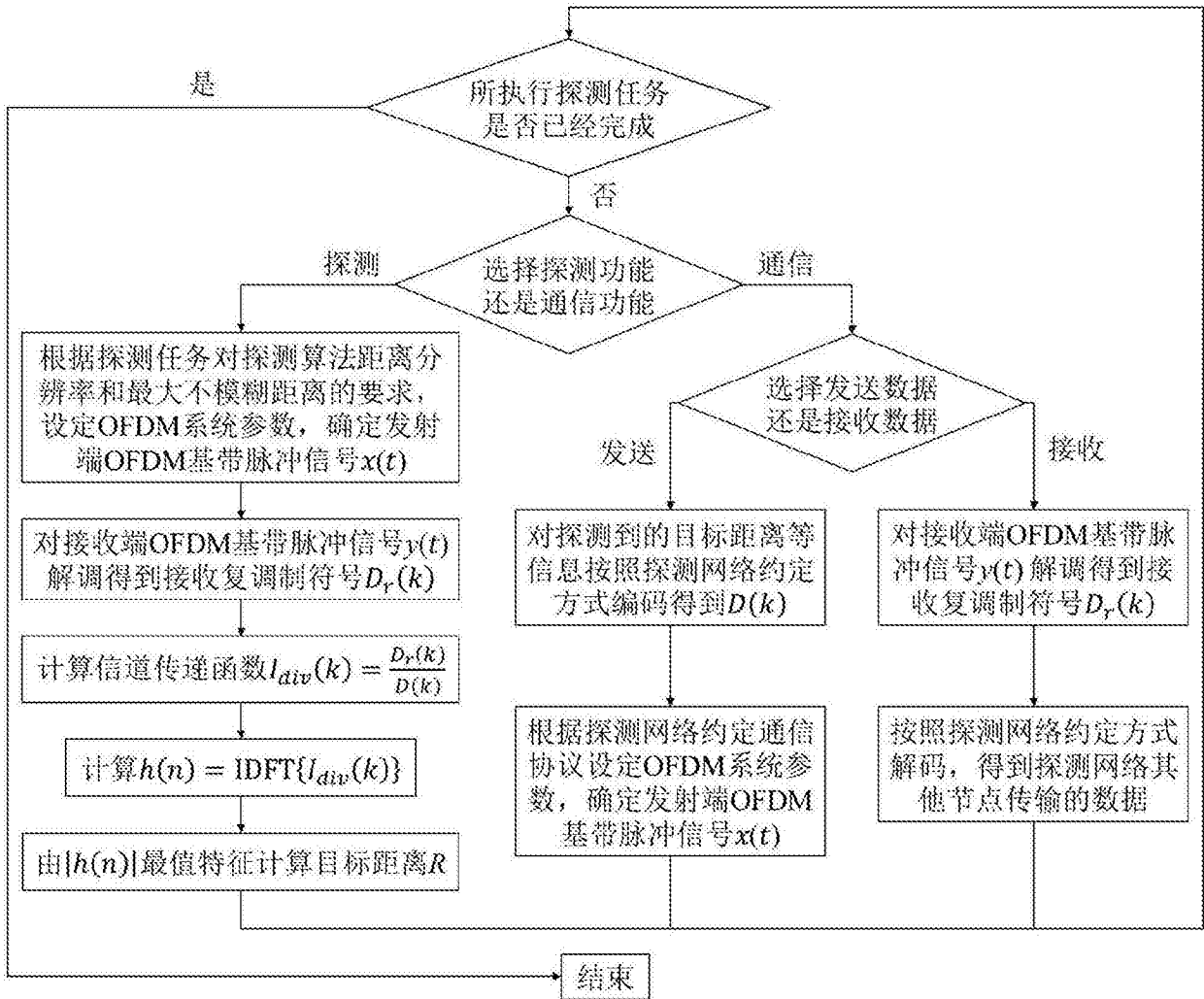


图5