



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114152916 A

(43) 申请公布日 2022. 03. 08

(21) 申请号 202111346268.7

(22) 申请日 2021.11.15

(71) 申请人 南京航空航天大学

地址 210016 江苏省南京市秦淮区御道街
29号

(72) 发明人 董浩 胡文 姚翼荣 王原正
张逸雯

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所
(普通合伙) 32204

代理人 王安琪

(51) Int. Cl.

G01S 7/282 (2006.01)

G01S 7/285 (2006.01)

G01S 7/292 (2006.01)

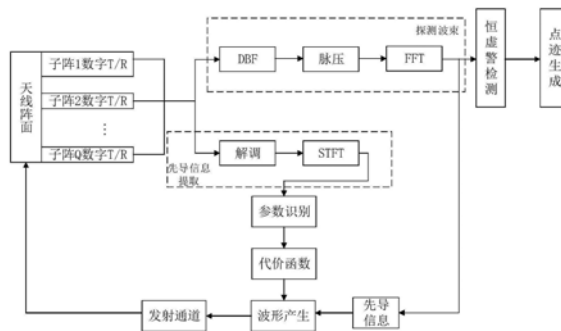
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法, MIMO雷达子阵之间可以先各自转发含有自己波形工作参数的先导信息, 先导信息调制到雷达波形中, 通过雷达子阵天线发射出去, 各子阵接收机经过中频滤波和解调后得到含有其他子阵先导信息的信号, 将该信号通过短时傅里叶变换后得到各自子阵先导信息的时频图, 由时频图判断各子阵之间波形是否正交。若波形之间不正交, 使用代价函数优化波形中的参数, 再将优化后的波形用于MIMO雷达, 在MIMO雷达进行目标探测过程中, 周期性地发射先导信息来不断感知MIMO雷达各子阵之间是否正交。本发明能够实现MIMO雷达波形正交, 进而提高雷达系统多普勒分辨率、抗截获能力以及对弱小目标的探测与跟踪。



1. 一种基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤1、将窄带信号先导信息先调制在MIMO雷达各子阵发射波形上,通过雷达数字发射机发射波形,其他子阵通过数字接收机接收波形并通过中频滤波器将其他子阵的先导信息提取出来;

步骤2、将步骤1中提取出的MIMO雷达其他各个子阵的单载频信号先导信息经过解调后,对其进行短时傅里叶变换STFT,得到MIMO雷达各个子阵先导信息对应的时频图;

步骤3、通过对步骤2的先导信息的时频图特征进行提取,若发现不同MIMO雷达子阵之间存在相同的工作参数,即不同子阵之间波形不正交,通过代价函数对波形的参数进行优化,使得各个子阵的工作参数独立,保持MIMO雷达波形正交;

步骤4、步骤3涉及的波形优化根据MIMO雷达波形设计正交原则构建波形优化代价函数,用模拟退火算法对波形编码参数进行优化,构造MIMO雷达发射波形;

步骤5、构建MIMO雷达发射波形数学模型,提供步骤4所需的波形设计所需优化的频率编码参数 ω_n^q 、脉位编码参数 ξ_n^q 和相位编码参数 $\phi_{n,m}^q$;

步骤6、提供步骤4中所需要的代价函数,对步骤5中的波形参数 ω_n^q 、 ξ_n^q 、 $\phi_{n,m}^q$ 进行优化;

步骤7、将步骤6优化后的波形用于MIMO雷达各个子阵进行目标探测,探测波束的回波信号进行数字波束合成、脉冲压缩以及FFT等信号处理方式后经过恒虚警检测生成相应的目标点迹,在探测过程中,MIMO雷达各子阵间周期性广播先导信息,再次执行步骤1至步骤6,进行MIMO雷达波形正交设计。

2. 如权利要求1所述的基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法,其特征在于,步骤2中,短时傅里叶变换公式如下所示:

$$STFT(k,u) = \sum_{m=0}^{M-1} x(m)W(m-u) \exp(-j2\pi \frac{m}{M}k)$$

其中 $k=0,1,\dots,K-1, K \in \mathbb{N}$, k 表示多普勒频率索引, $u=0,1,\dots,U-1, U \in \mathbb{N}$, u 表示时间索引, $W(\cdot)$ 是一个时域的窗, $m=0,1,\dots,M-1$ 表示慢时间的索引。

3. 如权利要求1所述的基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法,其特征在于,步骤5中,构建MIMO雷达发射波形数学模型,提供步骤4所需的波形设计所需优化的编码参数具体为:设MIMO雷达有 Q 个子阵,一个CPI内的脉冲个数为 N ,每个脉冲内采用码长为 M 的相位编码,第 q 个子阵发射信号的数学模型为:

$$s_q(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{rect} \left\{ \frac{t - nT_r - \xi_n \Delta T_r - mt_s}{t_p} \right\} \times e^{j2\pi(f_n^q t + \frac{1}{2}\mu t^2)} \times e^{j\phi_{n,m}^q}$$

其中, t_p 为脉冲宽度, T_r 为子脉冲的平均脉冲周期, ΔT_r 为最小脉位跳变间隔, t_s 为相位编码码元宽度, ξ_n 为 n 个子脉冲的脉位编码, f_n^q 为第 n 个子脉冲的载波, $f_n^q = f_0 + \omega_n^q \Delta f$, Δf 为频率最小间隔, μ 为调频斜率, $\phi_{n,m}^q$ 为第 n 个子脉冲的第 m 个码元,从发射信号的数学模型可知,波形优化参数为 ω_n^q 、 ξ_n^q 、 $\phi_{n,m}^q$,用向量表示记为 $\Psi = [\omega_1^q, \omega_2^q, \dots, \omega_N^q]$ 、 $\Omega = [\xi_1, \xi_2, \dots,$

$$\xi_N], \Phi = [\phi_1^l, \phi_2^l, \dots, \phi_N^l].$$

4. 如权利要求1所述的基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法,其特征在于,步骤6中,采用峰值旁瓣电平准则(PSL)进行正交波形设计,以发射波形的相位编码矩阵、载波的频率编码序列以及脉位捷变序列作为优化变量,构造的代价函数为:

$$\min_{\Phi, \Psi, \Omega} \max_{\substack{m, n=1, 2, \dots, M, m \neq n \\ 0 < \tau < T, -T < \nu < T}} \{ \omega |c_{mm}(\tau)| + (1-\omega) |c_{nn}(\nu)| \}$$

$$s.t. \quad \Psi \in \text{Perms} \{[\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]\}$$

$$\phi_{i,k,j} \in \left\{ 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} \right\}$$

$$\Omega \in \text{Perms} \{[\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p]\}$$

$$i=1, 2, \dots, M, k=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, Q$$

$$c_{pq}(\tau) = \begin{cases} \int_{\tau}^T s_p(t) s_q^*(t-\tau) dt, & 0 \leq \tau < T \\ \int_0^{T+\tau} s_p(t) s_q^*(t-\tau) dt, & -T \leq \tau < 0 \end{cases}$$

其中, $s_p(t)$ 和 $s_q(t)$ 为不同子阵的发射信号, 当 $p=q$ 时, $c_{pq}(\tau)$ 为发射信号的自相关函数; 当 $p \neq q$ 时, $c_{pq}(\tau)$ 为发射信号的互相关函数。

一种基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法

技术领域

[0001] 本发明涉及雷达信号处理技术领域,尤其是一种基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法。

背景技术

[0002] 随着各种隐身技术以及干扰技术的发展,雷达对目标探测和跟踪面临着前所未有的挑战,寻求新的雷达体制和信号处理手段,来提升雷达探测性能和自身抗干扰能力,是雷达工程人员追寻的目标。MIMO雷达可以实现多波束,且波束扫描范围较宽,对于存在较大起伏目标的探测效果显著。与具有M个相同阵元的相控阵雷达相比,MIMO雷达峰值功率和发射天线增益都仅为相控阵雷达的1/M,因此MIMO雷达具有抗截获优势。MIMO雷达可利用少数实体阵元形成多个虚拟阵列,进而扩大了阵列孔径,提高了阵列角度分辨率。MIMO雷达每个子阵发射的信号分量正交,其灵活性较强,自由度高。因此,MIMO雷达能满足强杂波环境下的若目标检测和多目标检测与跟踪。正交波形影响着MIMO雷达对弱目标的检测、影响其匹配滤波后信号的恢复效果以及雷达系统的距离分辨率,是有效提升MIMO雷达目标参数检测和跟踪性能的急需解决的难题。

发明内容

[0003] 本发明所要解决的技术问题在于,提供一种基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法,能够实现MIMO雷达波形正交,进而提高雷达系统多普勒分辨率、抗截获能力以及对弱小目标的探测与跟踪。

[0004] 为解决上述技术问题,本发明提供一种基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法,包括如下步骤:

[0005] 步骤1、将窄带信号先导信息先调制在MIMO雷达各子阵发射波形上,通过雷达数字发射机发射波形,其他子阵通过数字接收机接收波形并通过中频滤波器将其他子阵的先导信息提取出来;

[0006] 步骤2、将步骤1中提取出的MIMO雷达其他各个子阵的单载频信号先导信息经过解调后,对其进行短时傅里叶变换STFT,得到MIMO雷达各个子阵先导信息对应的时频图;

[0007] 步骤3、通过对步骤2的先导信息的时频图特征进行提取,若发现不同MIMO雷达子阵之间存在相同的工作参数,即不同子阵之间波形不正交,通过代价函数对波形的参数进行优化,使得各个子阵的工作参数独立,保持MIMO雷达波形正交;

[0008] 步骤4、步骤3涉及的波形优化根据MIMO雷达波形设计正交原则构建波形优化代价函数,用模拟退火算法对波形编码参数进行优化,构造MIMO雷达发射波形;

[0009] 步骤5、构建MIMO雷达发射波形数学模型,提供步骤4所需的波形设计所需优化的频率编码参数 ω_n^q 、脉位编码参数 ξ_n^q 和相位编码参数 $\phi_{n,m}^q$;

[0010] 步骤6、提供步骤4中所需要的代价函数,对步骤5中的波形参数 ω_n^q 、 ξ_n^q 、 $\phi_{n,m}^q$ 进行优化;

[0011] 步骤7、将步骤6优化后的波形用于MIMO雷达各个子阵进行目标探测,探测波束的回波信号进行数字波束合成、脉冲压缩以及FFT等信号处理方式后经过恒虚警检测生成相应的目标点迹,在探测过程中,MIMO雷达各子阵间周期性广播先导信息,再次执行步骤1至步骤6,进行MIMO雷达波形正交设计。

[0012] 优选的,步骤2中,短时傅里叶变换公式如下所示:

$$[0013] \quad STFT(k,u) = \sum_{m=0}^{M-1} x(m)W(m-u) \exp(-j2\pi \frac{m}{M}k)$$

[0014] 其中 $k=0,1,\dots,K-1, K \in \mathbb{N}$, k 表示多普勒频率索引, $u=0,1,\dots,U-1, U \in \mathbb{N}$, u 表示时间索引, $W(\cdot)$ 是一个时域的窗, $m=0,1,\dots,M-1$ 表示慢时间的索引。

[0015] 优选的,步骤5中,构建MIMO雷达发射波形数学模型,提供步骤4所需的波形设计所需优化的编码参数具体为:设MIMO雷达有 Q 个子阵,一个CPI内的脉冲个数为 N ,每个脉冲内采用码长为 M 的相位编码,第 q 个子阵发射信号的数学模型为:

$$[0016] \quad s_q(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{rect} \left\{ \frac{t - nT_r - \xi_n \Delta T_r - mt_s}{t_p} \right\} \times e^{j2\pi(f_n^q t + \frac{1}{2} \mu t^2)} \times e^{j\phi_{n,m}^q}$$

[0017] 其中, t_p 为脉冲宽度, T_r 为子脉冲的平均脉冲周期, ΔT_r 为最小脉位跳变间隔, t_s 为相位编码码元宽度, ξ_n 为 n 个子脉冲的脉位编码, f_n^q 为第 n 个子脉冲的载波, $f_n^q = f_0 + \omega_n^q \Delta f$, Δf 为频率最小间隔, μ 为调频斜率, $\phi_{n,m}^q$ 为第 n 个子脉冲的第 m 个码元,从发射信号的数学模型可知,波形优化参数为 ω_n^q 、 ξ_n^q 、 $\phi_{n,m}^q$,用向量表示记为 $\Psi = [\omega_1^q, \omega_2^q, \dots, \omega_N^q]$ 、 $\Omega = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N]$ 、 $\Phi = [\phi_1^q, \phi_2^q, \dots, \phi_N^q]$ 。

[0018] 优选的,步骤6中,采用峰值旁瓣电平准则(PSL)进行正交波形设计,以发射波形的相位编码矩阵、载波的频率编码序列以及脉位捷变序列作为优化变量,构造的代价函数为:

$$[0019] \quad \min_{\Phi, \Psi, \Omega} \max_{m,n=1,2,\dots,M, m \neq n} \left\{ \omega |c_{mm}(\tau)| + (1-\omega) |c_{mn}(\nu)| \right\}$$

$0 < \tau < T, -T < \nu < T$

$$[0020] \quad s.t. \quad \Psi \in \text{Perms} \{[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]\}$$

$$[0021] \quad \phi_{i,k,j} \in \left\{ 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} \right\}$$

$$[0022] \quad \Omega \in \text{Perms} \{[\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p]\}$$

$$[0023] \quad i=1,2,\dots,M, k=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,Q$$

$$[0024] \quad c_{pq}(\tau) = \begin{cases} \int_{\tau}^T s_p(t) s_q^*(t-\tau) dt, & 0 \leq \tau < T \\ \int_0^{T+\tau} s_p(t) s_q^*(t-\tau) dt, & -T \leq \tau < 0 \end{cases}$$

[0025] 其中, $s_p(t)$ 和 $s_q(t)$ 为不同子阵的发射信号,当 $p=q$ 时, $c_{pq}(\tau)$ 为发射信号的自相关函数;当 $p \neq q$ 时, $c_{pq}(\tau)$ 为发射信号的互相关函数。

[0026] 本发明的有益效果为:本发明能够解决MIMO雷达波形设计过程中,如何通过各MIMO雷达子阵间使用引导信息,广播各自的波形工作参数,使得各个子阵避开相同的波形

工作参数,提高子阵之间的正交性,以免削弱MIMO雷达系统的主副瓣比、正交性以及主瓣宽度,最终实现MIMO雷达波形正交,进而提高雷达系统多普勒分辨率、抗截获能力以及对弱小目标的探测与跟踪。

附图说明

[0027] 图1为本发明的方法流程示意图。

[0028] 图2为本发明优化后的MIMO雷达发射波形时域图。

[0029] 图3为本发明优化后的MIMO雷达发射波形频域图。

具体实施方式

[0030] 如图1所示,一种基于先导信息的MIMO雷达波形正交方法,包括如下步骤:

[0031] 步骤1、将窄带信号先导信息先调制在MIMO雷达各子阵发射波形上,通过雷达数字发射机发射波形,其他子阵通过数字接收机接收波形并通过中频滤波器将其他子阵的先导信息提取出来。

[0032] 步骤2、将步骤1中提取出的MIMO雷达其他各个子阵的单载频信号先导信息经过解调后,对其进行短时傅里叶变换(STFT),得到MIMO雷达各个子阵先导信息对应的时频图。短时傅里叶变换公式如下所示:

$$[0033] \quad STFT(k, u) = \sum_{m=0}^{M-1} x(m)W(m-u) \exp(-j2\pi \frac{m}{M}k)$$

[0034] 其中 $k=0, 1, \dots, K-1, K \in \mathbb{N}$, k 表示多普勒频率索引, $u=0, 1, \dots, U-1, U \in \mathbb{N}$, u 表示时间索引。 $W(\cdot)$ 是一个时域的窗。 $m=0, 1, \dots, M-1$ 表示慢时间的索引。

[0035] 步骤3、通过对步骤2的先导信息的时频图特征进行提取,若发现不同MIMO雷达子阵之间存在相同的工作参数,即不同子阵之间波形不正交,通过代价函数对波形的参数进行优化,使得各个子阵的工作参数独立,保持MIMO雷达波形正交。

[0036] 步骤4、步骤3涉及的波形优化根据MIMO雷达波形设计正交原则构建波形优化代价函数,用模拟退火算法对波形编码参数进行优化,构造MIMO雷达发射波形,优化后的波形如图2所示。

[0037] 步骤5、构建MIMO雷达发射波形数学模型,提供步骤4所需的波形设计所需优化的频率编码参数 ω_n^q 、脉位编码参数 ξ_n^q 和相位编码参数 $\phi_{n,m}^q$ 。

[0038] 设MIMO雷达有 Q 个子阵,一个CPI内的脉冲个数为 N ,每个脉冲内采用码长为 M 的相位编码,第 q 个子阵发射信号的数学模型为:

$$[0039] \quad s_q(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{rect} \left\{ \frac{t - nT_r - \xi_n \Delta T_r - mt_s}{t_p} \right\} \times e^{j2\pi(f_n^q t + \frac{1}{2}\mu t^2)} \times e^{j\phi_{n,m}^q}$$

[0040] 其中, t_p 为脉冲宽度, T_r 为子脉冲的平均脉冲周期, ΔT_r 为最小脉位跳变间隔, t_s 为相位编码码元宽度, ξ_n 为 n 个子脉冲的脉位编码, f_n^q 为第 n 个子脉冲的载波, $f_n^q = f_0 + \omega_n^q \Delta f$, Δf 为频率最小间隔, μ 为调频斜率, $\phi_{n,m}^q$ 为第 n 个子脉冲的第 m 个码元,从发射信号的数学模

型可知,波形优化参数为 ω_n^q 、 ξ_n^q 、 $\phi_{n,m}^q$,用向量表示记为 $\Psi = [\omega_1^l, \omega_2^l, \dots, \omega_N^l]$ 、 $\Omega = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N]$ 、 $\Phi = [\phi_1^l, \phi_2^l, \dots, \phi_N^l]$;

[0041] 步骤6、提供步骤4中所需要的代价函数,对步骤5中的波形参数 ω_n^q 、 ξ_n^q 、 $\phi_{n,m}^q$ 进行优化,此处采用峰值旁瓣电平准则 (PSL) 进行正交波形设计,以发射波形的相位编码矩阵、载波的频率编码序列以及脉位捷变序列作为优化变量,构造的代价函数为:

$$[0042] \quad \min_{\Phi, \Psi, \Omega} \max_{\substack{m, n=1, 2, \dots, M, m \neq n \\ 0 < \tau < T, -T < \nu < T}} \left\{ \omega |c_{mm}(\tau)| + (1-\omega) |c_{mm}(\nu)| \right\}$$

$$[0043] \quad s.t. \quad \Psi \in \text{Perms} \{[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]\}$$

$$[0044] \quad \phi_{i,k,j} \in \left\{ 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} \right\}$$

$$[0045] \quad \Omega \in \text{Perms} \{[\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_p]\}$$

$$[0046] \quad i=1, 2, \dots, M, k=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, Q$$

$$[0047] \quad c_{pq}(\tau) = \begin{cases} \int_{\tau}^T s_p(t) s_q^*(t-\tau) dt, & 0 \leq \tau < T \\ \int_0^{T+\tau} s_p(t) s_q^*(t-\tau) dt, & -T \leq \tau < 0 \end{cases}$$

[0048] 其中, $s_p(t)$ 和 $s_q(t)$ 为不同子阵的发射信号,当 $p=q$ 时, $c_{pq}(\tau)$ 为发射信号的自相关函数;当 $p \neq q$ 时, $c_{pq}(\tau)$ 为发射信号的互相关函数。

[0049] 步骤7、将步骤6优化后的波形用于MIMO雷达各个子阵进行目标探测,探测波束的回波信号进行数字波束合成、脉冲压缩以及FFT等信号处理方式后经过恒虚警检测生成相应的目标点迹,在探测过程中,MIMO雷达各子阵间周期性广播先导信息,再次执行步骤1至步骤6,进行MIMO雷达波形正交设计。

[0050] 本发明是为了解决MIMO雷达波形设计过程中,如何通过各MIMO雷达子阵间使用引导信息,广播各自的波形工作参数,使得各个子阵避开相同的波形工作参数,提高子阵之间的正交性,以免削弱MIMO雷达系统的主瓣比、正交性以及主瓣宽度,最终实现MIMO雷达波形正交,进而提高雷达系统多普勒分辨率、抗截获能力以及对弱小目标的探测与跟踪。

[0051] 当MIMO雷达子阵使用相同的波形工作参数(如载频、带宽、调频斜率和相位)时,MIMO雷达波形不能保持正交,进而影响雷达对目标探测和跟踪的精度。因此MIMO雷达子阵之间可以先各自转发含有自己波形工作参数的先导信息,先导信息调制到雷达波形中,通过雷达子阵天线发射出去,各子阵接收机经过中频滤波和解调后得到含有其他子阵先导信息的信号,将该信号通过短时傅里叶变换后得到各自子阵先导信息的时频图,由时频图判断各子阵之间波形是否正交。若波形之间不正交,使用代价函数优化波形中的参数,再将优化后的波形用于MIMO雷达,在MIMO雷达进行目标探测过程中,周期性地发射先导信息来不断感知MIMO雷达各子阵之间是否正交。

[0052] 本发明解决了目标探测过程中MIMO雷达各子阵因为工作参数相同而引起波形正交性差的问题,有效提升了MIMO雷达目标参数检测和跟踪性能。利用MIMO雷达各子阵先发射一段包含各自工作参数(如载频、调频斜率、带宽和相位等)的先导信息,其他MIMO雷达子

阵接收到这段先导信息后会避免使用相同的工作参数,若MIMO雷达其他子阵也在使用相同的工作参数时,通过波形优化对MIMO雷达各子阵的发射波形进行频率、相位和脉位联合编码,编码后的MIMO雷达各子阵的波形正交。优化后的波形用于目标探测,在探测过程中,MIMO雷达各子阵再周期性发射和接收先导信息来感知相互间波形正交性。使用先导信息极大的提高了MIMO雷达波形的正交性,进而提高雷达系统多普勒分辨率、抗截获能力以及对弱小目标的探测与跟踪。

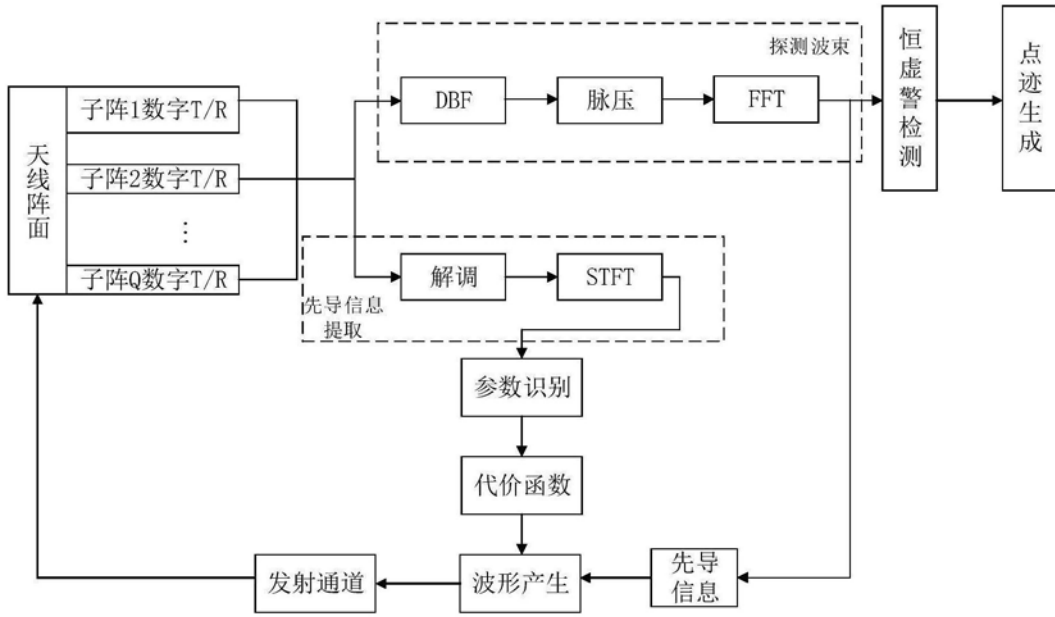


图1

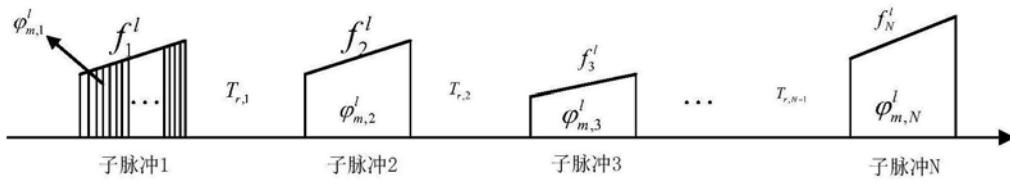


图2

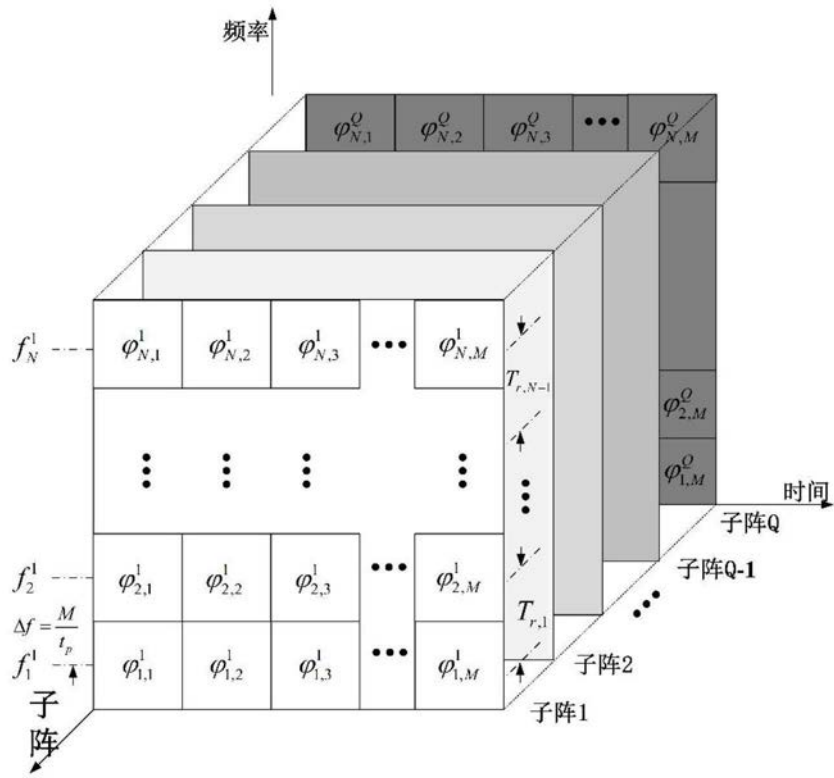


图3