



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114660552 B

(45) 授权公告日 2023.03.10

(21) 申请号 202210204507.3

G01S 19/37 (2010.01)

(22) 申请日 2022.03.03

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114660552 A

US 2019101639 A1, 2019.04.04

US 2009033549 A1, 2009.02.05

EP 3859882 A1, 2021.08.04

EP 2896971 A1, 2015.07.22

(43) 申请公布日 2022.06.24

CN 113419232 A, 2021.09.21

CN 108519608 A, 2018.09.11

CN 111458711 A, 2020.07.28

(73) 专利权人 北京卫星信息工程研究所
地址 100086 北京市海淀区知春路61号

(72) 发明人 夏正欢 刘新 赵志龙 张涛
尹心 董启甲 徐振兴 金世超
王海涛 岳富占 彭涛

夏正欢等. “一种新型无人机高分SAR信号非均匀混合采样技术”.《现代雷达》.2019,第41卷(第10期),

布金伟等. “星载GNSS-R海浪有效波高反演模型构建”.《测绘学报》.2022,第51卷(第9期),

Zhilong Zhao et al.. “A novel method of ship detection by combining space-borne SAR and GNSS-R”.《IET International Radar Conference (IET IRC 2020)》.2021,

(74) 专利代理机构 北京谨诚君睿知识产权代理有限公司 (特殊普通合伙)
11538

专利代理师 延慧

审查员 熊青

(51) Int. Cl.

G01S 7/36 (2006.01)

G01S 13/88 (2006.01)

G01S 13/90 (2006.01)

G01S 19/14 (2010.01)

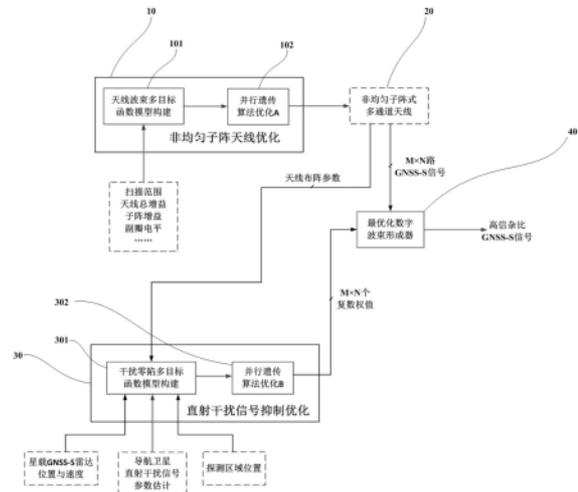
权利要求书3页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

星载GNSS-S雷达舰船目标信号接收与直射干扰抑制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种星载GNSS-S雷达舰船目标信号接收与直射干扰抑制方法,包括以下步骤:a、对天线进行优化;b、对直射干扰信号抑制进行优化;c、对GNSS-S信号进行数字波束形成。本发明能够接收大范围海面舰船目标的弱散射信号,并抑制多颗导航卫星的直射干扰信号。



1. 一种星载GNSS-S雷达舰船目标信号接收与直射干扰抑制方法,包括以下步骤:

- a、对天线进行优化;
- b、对直射干扰信号抑制进行优化;
- c、对GNSS-S信号进行数字波束形成;

星载GNSS-S雷达天线为非均匀子阵式多通道天线(20);

在所述步骤(a)中,对非均匀子阵式多通道天线(20)的非均匀子阵排布和子阵天线的阵元数进行优化,包括:

a1、根据天线扫描范围、天线总增益、子阵天线增益、天线主瓣宽度、天线副瓣电平,建立非均匀子阵天线优化多目标函数,搜索优化各子阵天线的阵元数,使整个天线方向图满足总增益最大、天线主瓣宽度最小、天线副瓣电平最小;

a2、利用并行遗传算法对非均匀子阵天线优化多目标函数的变量进行搜索优化,获得非均匀子阵式多通道天线(20)的最优排布方式、子阵天线的阵元数、各子阵天线对应的最优复数权值;

在所述步骤(b)中,对非均匀子阵式多通道天线(20)进行优化,对多颗导航卫星直射干扰信号进行深度抑制;

在所述步骤(c)中,利用最优化数字波束形成器(40)对非均匀子阵式多通道天线(20)输出的 $M \times N$ 个GNSS-S信号进行数字波束形成,获得高信杂比GNSS-S信号。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述非均匀子阵式多通道天线(20)包括:

$M \times N$ 个非均匀子阵天线(201),用于以宽波束对大区域海面舰船目标的散射信号进行接收,每个子阵天线的阵元数为 $K_{m,n}$,取3-10,距离向第 n 个阵元位置相对于距离向第1个阵元的位置偏移为 d_n ;

数字接收组件(202),用于对非均匀子阵天线(201)输出的GNSS-S信号进行低噪声放大、带通滤波、下变频、中频放大、中频信号采样量化,获得数字域中频GNSS-S信号,记方位向第 m 个、距离向第 n 个数字域中频GNSS-S信号为 $s_{m,n}(t)$, t 为快时间变量。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,天线在方位向扫描范围为 $\varphi \in [-\varphi_{\max}, \varphi_{\max}]$,在距离向扫描范围为 $\theta \in [-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$, φ_{\max} 取 3° - 6° , θ_{\max} 取 20° - 30° ;

天线总增益 $G \geq G_0$,子阵天线增益 $GS \geq GS_0$, G_0 取30dB-45dB, GS_0 取10dB-20dB;

天线在方位向的主瓣宽度 $\Phi \leq \Phi_0$,天线在距离向的主瓣宽度 $\Theta \leq \Theta_0$, Φ_0 取 1° - 2° , Θ_0 取 3° - 6° ;

当天线波束中心指向 (φ_k, θ_k) 时,天线方向图 $F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k})$ 的副瓣电平为 $\max\{P_{SL}(F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k}))\} \leq P_0$, P_0 取-13dB至-18dB;

非均匀子阵天线优化多目标函数为:

$$\begin{cases} f_1 = \max\{G\} \\ f_2 = \min\{\Phi\} \\ f_3 = \min\{\Theta\} \\ f_4 = \min\{\max\{P_{SL}(F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k}))\}\} \end{cases};$$

加权组合后的目标函数为:

$$f(K_{m,n}, d_n, A_{m,n}, a_{m,n}) = -w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3 + w_4 \cdot f_4;$$

其中, $\sum_{i=1}^4 w_i = 1$, 且 $w_1 \in [0.2, 0.3]$, $w_2 \in [0.1, 0.2]$, $w_3 \in [0.1, 0.2]$, $w_4 \in [0.5, 0.8]$; 多目标函数优化的变量为 $K_{m,n}$ 、 d_n 、 $A_{m,n}$ 、 $a_{m,n}$; $K_{m,n} \in [3, 10]$; d_n 为第 n 个距离向子阵沿方位向的距离偏移量, 且 $d_n \in [0, 10\lambda_c]$, λ_c 为工作中心频率对应的波长; $A_{m,n}$ 与 $a_{m,n}$ 分别为方位向第 m 个、距离向第 n 个子阵天线的幅度值与相位值; $P_{SL}(\cdot)$ 为求取天线方向图最大副瓣电平的函数;

利用并行遗传算法对加权组合后的目标函数 $f(K_{m,n}, d_n, A_{m,n}, a_{m,n})$ 进行搜索优化, 获得多目标函数变量的最优值 $\text{opt}\{K_{m,n}\}$ 、 $\text{opt}\{d_n\}$ 、 $\text{opt}\{A_{m,n}\}$ 、 $\text{opt}\{a_{m,n}\}$, 获得各个子阵天线的阵元数 $\text{opt}\{K_{m,n}\}$ 与距离向的偏移量 $\text{opt}\{d_n\}$, 完成非均匀子阵式多通道天线 (20) 布阵。

4. 根据权利要求 2 所述的方法, 其特征在于, 所述步骤 (b) 包括:

b1、建立直射干扰信号抑制优化多目标函数, 对 P 个导航卫星直射干扰信号实现抑制深度最大化, 使整个天线方向图满足总增益最大、天线主瓣宽度最小、天线副瓣电平最小;

b2、利用并行遗传算法对直射干扰信号抑制优化多目标函数进行搜索优化, 获得各个子阵天线的最优复数权值, 实现对 P 个直射干扰信号的深度抑制。

5. 根据权利要求 4 所述的方法, 其特征在于, 根据多颗导航卫星位置与速度、星载 GNSS-S 雷达位置与速度、天线安装角、探测区域, 计算多颗导航卫星的直射干扰信号的角度, 以天线法线方向为参考, 计算出第 p 颗导航卫星的直射干扰信号角度 $(\theta_{s_p}, \varphi_{s_p})$;

根据多颗导航卫星位置与速度、星载 GNSS-S 雷达位置与速度、天线安装角, 计算多颗导航卫星的直射干扰信号功率, 计算出第 p 颗导航卫星的直射干扰信号功率 P_{s_p} ;

根据双站雷达方程, 计算出星载 GNSS-S 雷达对最小可检测舰船目标的回波功率 $P_{t_{\min}}$, 与每颗导航卫星直射干扰信号功率满足 $P_{t_{\min}} \geq P_{s_p} - G_{y_p}$, $p = 1, 2, \dots, P$, 其中, G_{y_p} 为天线对第 p 颗导航卫星直射干扰信号的抑制深度; P 为直射干扰信号的导航卫星总数;

第 p 颗导航卫星直射干扰信号的抑制宽度在方位向满足 $\Delta \Phi_p \in [\Phi_0, 2\Phi_0]$, 在距离向满足 $\Delta \Theta_p \in [\Theta_0, 2\Theta_0]$;

优化搜索各天线子阵的加权幅度 $A_{1_{m,n}}$ 与相位 $a_{1_{m,n}}$, 使 P 个导航卫星直射干扰信号的抑制深度最大化, 使整个天线方向图满足总增益最大、天线主瓣宽度最小、天线副瓣电平最小, 则直射干扰信号抑制优化多目标函数为:

$$\begin{cases} g_1 = \max\{G\} \\ g_2 = \min\{\Phi\} \\ g_3 = \min\{\Theta\} \\ g_4 = \min\{\max\{P_{SL}(F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k}))\}\} \\ g_5 = \max_{\varphi, \theta} \left\{ \sum_{p=1}^P G_{y_p} \right\}, \varphi \in [\varphi_{s_p} - \Delta\Phi_p / 2, \varphi_{s_p} + \Delta\Phi_p / 2], \theta \in [\theta_{s_p} - \Delta\Theta_p / 2, \theta_{s_p} + \Delta\Theta_p / 2] \end{cases};$$

经过加权组合后的目标函数为:

$$g(A_{1_{m,n}}, a_{1_{m,n}}) = -\gamma_1 \cdot g_1 + \gamma_2 \cdot g_2 + \gamma_3 \cdot g_3 + \gamma_4 \cdot g_4 - \gamma_5 \cdot g_5;$$

其中, $\sum_{i=1}^5 \gamma_i = 1$, 且 $\gamma_1 \in [0.2, 0.3]$, $\gamma_2 \in [0.1, 0.2]$, $\gamma_3 \in [0.1, 0.2]$, $\gamma_4 \in [0.35, 0.5]$, $\gamma_5 \in [0.35, 0.5]$; θ_{s_p} 为第 p 个导航卫星的直射干扰信号入射角与天线波束中心入射角的夹角; φ_{s_p} 为第 p 个导航卫星的直射干扰信号方位角与天线波束中心方位角的夹角;

利用并行遗传算法对加权组合后的目标函数 $g(A1_{m,n}, a1_{m,n})$ 进行搜索优化,获得多目标函数变量的最优值 $\text{opt}\{A1_{m,n}\}$ 与 $\text{opt}\{a1_{m,n}\}$,将天线的 $M \times N$ 个子阵天线输出的信号 $s_{m,n}(t)$ 进行复数加权后,实现数字波束合成 $\overline{S(t)} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A1_{m,n} \cdot s_{m,n}(t) \cdot e^{-j \cdot a1_{m,n}}$; $\overline{S(t)}$ 为数字波束形成后的回波信号; e 为自然对数函数的底数; $j = \sqrt{-1}$;

对不同波束指向的探测区域,调整波束中心指向角度,利用并行遗传算法重复对直射干扰信号抑制优化多目标函数进行搜索优化,获得不同波束指向的最优化复数权值,实现大范围海面舰船目标探测时的P颗导航卫星直射干扰信号深度抑制。

6. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,最优化数字波束形成器(40)包括:

N 个方位向数字波束形成器(401),用于对距离向每行输出的数字域中频GNSS-S信号进行方位向复数加权,第 n 个方位向数字波束形成器(401)的输出为 $\overline{S_n(t)} = \sum_{m=1}^M s_{m,n}(t) \cdot A1_{m,n} \cdot e^{-j \cdot a1_{m,n}}$;

距离向数字波束形成器(402),用于对距离向的GNSS-S信号进行复数加权 $\overline{S(t)} = \sum_{n=1}^N \overline{S_n(t)}$, $M \times N$ 个复数权值 $A1_{m,n}$ 、 $a1_{m,n}$ 通过多目标函数建模与遗传算法搜索优化得到最优值 $\text{opt}\{A1_{m,n}\}$ 、 $\text{opt}\{a1_{m,n}\}$,实现对多颗导航卫星直射干扰信号的深度抑制,其中, $\overline{S_n(t)}$ 为第 n 个方位向数字波束形成输出的回波信号。

7. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,非均匀子阵式多通道天线(20)在方位向采用非均匀子阵式相控阵天线技术,在距离向采用全数字阵列天线技术;

非均匀子阵式多通道天线(20)以正侧视模式工作,方位向与距离向分别包括的 M 个子阵天线与 N 个阵元对应 $M \times N$ 个接收通道,每个接收通道均为宽波束;

非均匀子阵式多通道天线(20)的工作频率范围为1.17GHz-1.29GHz,极化方式为左旋圆极化,天线总增益大于30dB;

大区域海面被 Q 个导航卫星照射作为散射源,被 P 个导航卫星信号直射作为干扰源;

第 p 个导航卫星的直射干扰信号入射角与天线波束中心入射角的夹角为 θ_{s_p} ,第 p 个导航卫星干扰源与星载GNSS-S雷达天线的间距为 R_{t_p} ,到达天线处的功率为 P_{s_p} ;

第 p 个导航卫星的直射干扰信号方位角与天线波束中心方位角的夹角为 φ^{s_p} ,天线波束中心的方位角为 0° ;

利用数字波束形成对 $M \times N$ 个通道输出的GNSS-S信号进行波束形成,获得 K 个数字子波束,第 k 个数字子波束对应的幅宽为 W_k ,探测总幅宽为 $W_s = \sum_{k=1}^K W_k$;

数字波束形成后,天线主瓣在方位向与距离向均呈现窄波束,在距离向形成多个数字子波束,以实现大区域海面舰船目标的散射信号接收。

星载GNSS-S雷达舰船目标信号接收与直射干扰抑制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种星载GNSS-S雷达舰船目标信号接收与直射干扰抑制方法。

背景技术

[0002] 大区域海面舰船目标探测一直是科学研究的热点,受海上云雨雾等天气的影响,光学传感器难以在探测中发挥其高分辨率成像与识别优势,而星载SAR系统则能够穿云透雾,具备全天时全天候对海观测的特点,适合海面舰船目标的高分辨率成像与探测应用。但是,现有的星载SAR系统难以实现舰船目标的长时间跟踪,且现有技术通常采用主动发射大功率信号的方式,因此易被截获与干扰。

[0003] 对此,一些技术利用导航卫星信号的反射信号(GNSS-R)完成海面风场探测,并实现了低轨卫星搭载试验。同时,也有技术提出在地基利用导航卫星信号的散射信号(GNSS-S)实现星发地收双站SAR成像,但受限于导航卫星信号的有效带宽,其成像分辨率一般在10m以上,因此难以实现米级分辨率SAR成像,不利于图像域舰船目标识别。

[0004] 而星载GNSS-S雷达则可以接收导航卫星信号的舰船目标散射信号,再经过信号处理后即可实现舰船目标探测,无需主动发射大功率信号,具有低功耗、轻量化等优势,或将成为空间对海面舰船探测的重要技术手段之一。然而,导航卫星信号功率较低,再经过双程衰减后,舰船目标散射信号功率远低于噪声功率。此外,由于在轨导航卫星数量较多,因此部分导航卫星信号将直接进入星载GNSS-S雷达天线而成为直射干扰信号,且直射干扰信号功率比舰船目标散射信号功率一般要大30-50dB。因此,亟待探索出一种大范围海面舰船目标信号接收与直射干扰信号抑制技术,以提高对大范围海面舰船目标的探测性能。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种星载GNSS-S雷达舰船目标信号接收与直射干扰抑制方法。

[0006] 为实现上述发明目的,本发明提供一种星载GNSS-S雷达舰船目标信号接收与直射干扰抑制方法,包括以下步骤:

[0007] a、对天线进行优化;

[0008] b、对直射干扰信号抑制进行优化;

[0009] c、对GNSS-S信号进行数字波束形成。

[0010] 根据本发明的一个方面,星载GNSS-S雷达天线为非均匀子阵式多通道天线,包括:

[0011] $M \times N$ 个非均匀子阵天线,用于以宽波束对大区域海面舰船目标的散射信号进行接收,每个子阵天线的阵元数为 $K_{m,n}$,取3-10,距离向第 n 个阵元位置相对于距离向第1个阵元的位置偏移为 d_n ;

[0012] 数字接收组件,用于对非均匀子阵天线输出的GNSS-S信号进行低噪声放大、带通滤波、下变频、中频放大、中频信号采样量化,获得数字域中频GNSS-S信号,记方位向第 m 个、距离向第 n 个数字域中频GNSS-S信号为 $s_{m,n}(t)$, t 为快时间变量。

[0013] 根据本发明的一个方面,在所述步骤(a)中,对非均匀子阵式多通道天线的非均匀子阵排布和子阵天线的阵元数进行优化,包括:

[0014] a1、根据天线扫描范围、天线总增益、子阵天线增益、天线主瓣宽度、天线副瓣电平,建立非均匀子阵天线优化多目标函数,搜索优化各子阵天线的阵元数,使整个天线方向图满足总增益最大、天线主瓣宽度最小、天线副瓣电平最小;

[0015] a2、利用并行遗传算法对非均匀子阵天线优化多目标函数的变量进行搜索优化,获得非均匀子阵式多通道天线的最优排布方式、子阵天线的阵元数、各子阵天线对应的最优复数权值。

[0016] 根据本发明的一个方面,天线在方位向扫描范围为 $\varphi \in [-\varphi_{\max}, \varphi_{\max}]$,在距离向扫描范围为 $\theta \in [-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$, φ_{\max} 取 $3^\circ-6^\circ$, θ_{\max} 取 $20^\circ-30^\circ$;

[0017] 天线总增益 $G \geq G_0$,子阵天线增益 $GS \geq GS_0$, G_0 取30dB-45dB, GS_0 取10dB-20dB;

[0018] 天线在方位向的主瓣宽度 $\Phi \leq \Phi_0$,天线在距离向的主瓣宽度 $\Theta \leq \Theta_0$, Φ_0 取 $1^\circ-2^\circ$, Θ_0 取 $3^\circ-6^\circ$;

[0019] 当天线波束中心指向 (φ_k, θ_k) 时,天线方向图 $F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k})$ 的副瓣电平为 $\max\{P_{SL}(F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k}))\} \leq P_0$, P_0 取-13dB至-18dB;

[0020] 非均匀子阵天线优化多目标函数为:

$$[0021] \begin{cases} f_1 = \max\{G\} \\ f_2 = \min\{\Phi\} \\ f_3 = \min\{\Theta\} \\ f_4 = \min\{\max\{P_{SL}(F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k}))\}\} \end{cases};$$

[0022] 加权组合后的目标函数为:

$$[0023] f(K_{m,n}, d_n, A_{m,n}, a_{m,n}) = -w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3 + w_4 \cdot f_4;$$

[0024] 其中, $\sum_{i=1}^4 w_i = 1$,且 $w_1 \in [0.2, 0.3]$, $w_2 \in [0.1, 0.2]$, $w_3 \in [0.1, 0.2]$, $w_4 \in [0.5, 0.8]$;

多目标函数优化的变量为 $K_{m,n}$ 、 d_n 、 $A_{m,n}$ 、 $a_{m,n}$; $K_{m,n}$ 为方位向第m个、距离向第n个子阵天线的天线阵元数,且 $K_{m,n} \in [3, 10]$; d_n 为第n个距离向子阵沿方位向的距离偏移量,且 $d_n \in [0, 10\lambda_c]$, λ_c 为工作中心频率对应的波长; $A_{m,n}$ 与 $a_{m,n}$ 分别为方位向第m个、距离向第n个子阵天线的幅度值与相位值; $P_{SL}(\cdot)$ 为求取天线方向图最大副瓣电平的函数;

[0025] 利用并行遗传算法对加权组合后的目标函数 $f(K_{m,n}, d_n, A_{m,n}, a_{m,n})$ 进行搜索优化,获得多目标函数变量的最优值 $\text{opt}\{K_{m,n}\}$ 、 $\text{opt}\{d_n\}$ 、 $\text{opt}\{A_{m,n}\}$ 、 $\text{opt}\{a_{m,n}\}$,获得各个子阵天线的阵元数 $\text{opt}\{K_{m,n}\}$ 与距离向的偏移量 $\text{opt}\{d_n\}$,完成非均匀子阵式多通道天线布阵。

[0026] 根据本发明的一个方面,在所述步骤(b)中,对非均匀子阵式多通道天线进行优化,对多颗导航卫星直射干扰信号进行深度抑制。

[0027] 根据本发明的一个方面,所述步骤(b)包括:

[0028] b1、建立直射干扰信号抑制优化多目标函数,对P个导航卫星直射干扰信号实现抑制深度最大化,使整个天线方向图满足总增益最大、天线主瓣宽度最小、天线副瓣电平最小;

[0029] b2、利用并行遗传算法对直射干扰信号抑制优化多目标函数进行搜索优化,获得各个子阵天线的最优复数权值,实现对P个直射干扰信号的深度抑制。

[0030] 根据本发明的一个方面,根据多颗导航卫星位置与速度、星载GNSS-S雷达位置与速度、天线安装角、探测区域等信息,计算多颗导航卫星的直射干扰信号的角度,以天线法线方向为参考,计算出第p颗导航卫星的直射干扰信号角度 $(\theta_{s_p}, \varphi_{s_p})$;

[0031] 根据多颗导航卫星位置与速度、星载GNSS-S雷达位置与速度、天线安装角,计算多颗导航卫星的直射干扰信号功率,计算出第p颗导航卫星的直射干扰信号功率 P_{s_p} ;

[0032] 根据双站雷达方程,计算出星载GNSS-S雷达对最小可检测舰船目标的回波功率 $P_{t_{min}}$,与每颗导航卫星直射干扰信号功率满足 $P_{t_{min}} \geq P_{s_p} \cdot G_{y_p}$, $p=1, 2, \dots, P$,其中, G_{y_p} 为天线对第p颗导航卫星直射干扰信号的抑制深度; P 为直射干扰信号的导航卫星总数;

[0033] 第p颗导航卫星直射干扰信号的抑制宽度在方位向满足 $\Delta \Phi_p \in [\Phi_0, 2\Phi_0]$,在距离向满足 $\Delta \Theta_p \in [\Theta_0, 2\Theta_0]$;

[0034] 优化搜索各天线子阵的加权幅度 $A_{1_{m,n}}$ 与相位 $a_{1_{m,n}}$,使P个导航卫星直射干扰信号的抑制深度最大化,使整个天线方向图满足总增益最大、天线主瓣宽度最小、天线副瓣电平最小,则直射干扰信号抑制优化多目标函数为:

$$[0035] \begin{cases} g_1 = \max \{G\} \\ g_2 = \min \{\Phi\} \\ g_3 = \min \{\Theta\} \\ g_4 = \min \{ \max \{ P_{SL}(F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k})) \} \} \\ g_5 = \max_{\varphi, \theta} \{ \sum_{p=1}^P G_{y_p} \}, \varphi \in [\varphi_{s_p} - \Delta\Phi_p / 2, \varphi_{s_p} + \Delta\Phi_p / 2], \theta \in [\theta_{s_p} - \Delta\Theta_p / 2, \theta_{s_p} + \Delta\Theta_p / 2] \end{cases} ;$$

[0036] 经过加权组合后的目标函数为:

$$[0037] g(A_{1_{m,n}}, a_{1_{m,n}}) = -\gamma_1 \cdot g_1 + \gamma_2 \cdot g_2 + \gamma_3 \cdot g_3 + \gamma_4 \cdot g_4 - \gamma_5 \cdot g_5;$$

[0038] 其中, $\sum_{i=1}^5 \gamma_i = 1$, 且 $\gamma_1 \in [0.2, 0.3]$, $\gamma_2 \in [0.1, 0.2]$, $\gamma_3 \in [0.1, 0.2]$, $\gamma_4 \in [0.35, 0.5]$, $\gamma_5 \in [0.35, 0.5]$;

[0039] 利用并行遗传算法对加权组合后的目标函数 $g(A_{1_{m,n}}, a_{1_{m,n}})$ 进行搜索优化,获得多目标函数变量的最优值 $\text{opt}\{A_{1_{m,n}}\}$ 与 $\text{opt}\{a_{1_{m,n}}\}$,将天线的 $M \times N$ 个子阵天线输出的信号 $s_{m,n}(t)$ 进行复数加权后,实现数字波束合成 $\overline{S(t)} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{1_{m,n}} \cdot s_{m,n}(t) \cdot e^{-j a_{1_{m,n}}}$, $\overline{S(t)}$ 为数字波束形成后

的回波信号; e 为自然对数函数的底数; $j = \sqrt{-1}$;

[0040] 对不同波束指向的探测区域,调整波束中心指向角度,利用并行遗传算法重复对直射干扰信号抑制优化多目标函数进行搜索优化,获得不同波束指向的最优化复数权值,实现大范围海面舰船目标探测时的P颗导航卫星直射干扰信号深度抑制。

[0041] 根据本发明的一个方面,在所述步骤(c)中,利用最优化数字波束形成器对非均匀子阵式多通道天线输出的 $M \times N$ 个GNSS-S信号进行数字波束形成,获得高信杂比GNSS-S信号。

[0042] 根据本发明的一个方面,最优化数字波束形成器包括:

[0043] N个方位向数字波束形成器,用于对距离向每行输出的数字域中频GNSS-S信号进

行方位向复数加权,第n个方位向数字波束形成器的输出为 $\overline{S_n(t)} = \sum_{m=1}^M s_{m,n}(t) \cdot A_{1_{m,n}} \cdot e^{-j \cdot a_{1_{m,n}}}$;

[0044] 距离向数字波束形成器,用于对距离向的GNSS-S信号进行复数加权 $\overline{S(t)} = \sum_{n=1}^N \overline{S_n(t)}$, $M \times N$ 个复数权值 $A_{1_{m,n}}$ 、 $a_{1_{m,n}}$ 通过多目标函数建模与遗传算法搜索优化得到最优值 $\text{opt}\{A_{1_{m,n}}\}$ 、 $\text{opt}\{a_{1_{m,n}}\}$,实现对多颗导航卫星直射干扰信号的深度抑制,其中, $\overline{S_n(t)}$ 为第n个方位向数字波束形成输出的回波信号。

[0045] 根据本发明的一个方面,非均匀子阵式多通道天线在方位向采用非均匀子阵式相控阵天线技术,在距离向采用全数字阵列天线技术;

[0046] 非均匀子阵式多通道天线以正侧视模式工作,方位向与距离向分别包括的M个子阵天线与N个阵元对应 $M \times N$ 个接收通道,每个接收通道均为宽波束;

[0047] 非均匀子阵式多通道天线的工作频率范围为1.17GHz-1.29GHz,极化方式为左旋圆极化,天线总增益大于30dB;

[0048] 大区域海面被Q个导航卫星照射作为散射源,被P个导航卫星信号直射作为干扰源;

[0049] 第p个导航卫星的直射干扰信号入射角与天线波束中心入射角的夹角为 θ_{s_p} ,第p个导航卫星干扰源与星载GNSS-S雷达天线的间距为 R_{t_p} ,到达天线处的功率为 P_{s_p} ;

[0050] 第p个导航卫星的直射干扰信号方位角与天线波束中心方位角的夹角为 φ_{s_p} ,天线波束中心的方位角为 0° ;

[0051] 利用数字波束形成对 $M \times N$ 个通道输出的GNSS-S信号进行波束形成,获得K个数字子波束,第k个数字子波束对应的幅宽为 W_k ,探测总幅宽为 $W_s = \sum_{k=1}^K W_k$;

[0052] 数字波束形成后,天线主瓣在方位向与距离向均呈现窄波束,在距离向形成多个数字子波束,以实现大区域海面舰船目标的散射信号接收。

[0053] 根据本发明的构思,提出一种星载GNSS-S雷达的大区域舰船信号接收与直射干扰抑制方法,从而能够接收大范围海面舰船目标的弱散射信号,并抑制多颗导航卫星的直射干扰信号。

[0054] 根据本发明的一个方案,星载GNSS-S雷达采用非均匀子阵式多通道天线对大范围海面舰船目标的弱散射信号进行同步接收,根据天线扫描范围、天线总增益、子阵天线增益、波束副瓣电平等要求,建立非均匀子阵天线优化多目标函数,并利用遗传算法对多目标函数进行搜索优化,获得非均匀子阵式多通道天线排布与各个子阵阵元数。另外,根据多颗导航卫星位置与速度、星载GNSS-S雷达位置与速度、天线安装角、探测区域等信息,计算出多颗导航卫星的直射干扰信号的角度与功率,建立直射干扰信号抑制优化多目标函数,并利用遗传算法对非均匀子阵的复数权值进行搜索优化,实现对多个角度的导航卫星直射干扰信号进行深度抑制,提高海面舰船目标散射信号的信杂比,实现最优化数字波束形成。如此,使得本方法具有接收范围大、灵敏度高、子阵数量少、干扰抑制比高等优势,且能够对多颗导航卫星直射干扰信号进行深度抑制,以提高海面舰船目标散射信号的信杂比,具有较高的应用价值和广阔的市场应用前景。

[0055] 根据本发明的一个方案,采用非均匀子阵式多通道天线优化技术,在保证方位向

波束扫描性能要求下,大幅降低了天线的接收通道数量,简化了星载GNSS-S雷达系统复杂度,具有接收通道数少、系统复杂度低、功耗低等优势,适合于大区域海面舰船目标探测与空间直射干扰信号抑制应用。

附图说明

[0056] 图1示意性表示本发明的一种实施方式的星载GNSS-S雷达天线优化与直射干扰抑制方法的流程图;

[0057] 图2示意性表示本发明的一种实施方式的星载GNSS-S雷达非均匀子阵式多通道天线组成图;

[0058] 图3表示本发明的一种实施方式的星载GNSS-S雷达大范围海面舰船目标探测场景示意图;

[0059] 图4表示本发明的一种实施方式的第p个直射干扰信号相对天线波束中心的入射角示意图;

[0060] 图5表示本发明的一种实施方式的第p个直射干扰信号相对天线波束中心的方位角示意图;

[0061] 图6表示本发明的一种实施方式的非均匀子阵式天线对P个直射干扰抑制区的角度分布示意图。

具体实施方式

[0062] 为了更清楚地说明本发明实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施方式,对于本领域普通技术人员而言,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0063] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作详细地描述,实施方式不能在此一一赘述,但本发明的实施方式并不因此限定于以下实施方式。

[0064] 参见图1,本发明的星载GNSS-S雷达的大区域(大范围)海面舰船目标信号接收与导航卫星直射干扰抑制(即直射干扰信号抑制)方法,可应用于天基分布式高分宽幅SAR成像系统研究,并在星载雷达系统中使用,实现大范围舰船目标探测与空间直射干扰信号抑制。本方法首先进行非均匀子阵天线优化10,即对星载GNSS-S雷达的非均匀子阵天线进行优化,包括对非均匀子阵排布和子阵天线的阵元数等进行优化,在保证天线波束性能的情况下,尽量减少子阵天线数量。然后,进行直射干扰信号抑制优化30,即,对非均匀子阵式多通道天线20进行优化,对多颗导航卫星直射干扰信号抑制进行优化,从而实现深度抑制。最后,利用最优化数字波束形成器40对非均匀子阵式多通道天线20输出的 $M \times N$ 个GNSS-S信号进行数字波束形成,获得高信杂比GNSS-S信号。

[0065] 非均匀子阵天线优化10包括:天线波束多目标函数模型构建101,即根据天线扫描范围、天线总增益、子阵天线增益、天线主瓣宽度、天线副瓣电平等要求,建立非均匀子阵天线优化多目标函数,搜索优化各子阵天线的阵元数等多个变量,使整个天线方向图满足总增益最大、天线主瓣宽度最小、天线副瓣电平最小;并行遗传算法优化A102,即利用遗传算法对非均匀子阵天线优化多目标函数的变量进行搜索优化,获得非均匀子阵式多通道天线

20的最优排布方式、各非均匀子阵天线的阵元数、各子阵天线对应的最优复数权值。

[0066] 在具体的非均匀子阵天线优化多目标函数建模与搜索优化过程中,天线在方位向扫描范围为 $\varphi \in [-\varphi_{\max}, \varphi_{\max}]$,在距离向扫描范围为 $\theta \in [-\theta_{\max}, \theta_{\max}]$, φ_{\max} 取 $3^\circ - 6^\circ$, θ_{\max} 取 $20^\circ - 30^\circ$;天线总增益为 $G \geq G_0$,子阵天线增益为 $GS \geq GS_0$, G_0 取30dB-45dB, GS_0 取10dB-20dB;天线在方位向的主瓣宽度为 $\Phi \leq \Phi_0$,天线在距离向的主瓣宽度为 $\Theta \leq \Theta_0$, Φ_0 取 $1^\circ - 2^\circ$, Θ_0 取 $3^\circ - 6^\circ$;当天线波束中心指向 (φ_k, θ_k) 时,天线方向图 $F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k})$ 的副瓣电平为 $\max\{P_{SL}(F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k}))\} \leq P_0$, P_0 取-13dB至-18dB。

[0067] 非均匀子阵天线优化多目标函数为:

$$[0068] \quad \begin{cases} f_1 = \max\{G\} \\ f_2 = \min\{\Phi\} \\ f_3 = \min\{\Theta\} \\ f_4 = \min\{\max\{P_{SL}(F(\varphi, \theta |_{\varphi_k, \theta_k}))\}\} \end{cases};$$

[0069] 加权组合后的目标函数为:

$$[0070] \quad f(K_{m,n}, d_n, A_{m,n}, a_{m,n}) = -w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3 + w_4 \cdot f_4;$$

[0071] 其中, $\sum_{i=1}^4 w_i = 1$,且 $w_1 \in [0.2, 0.3]$, $w_2 \in [0.1, 0.2]$, $w_3 \in [0.1, 0.2]$, $w_4 \in [0.5, 0.8]$;

使天线副瓣电平最小化函数占比更大;多目标函数优化的变量为 $K_{m,n}$ 、 d_n 、 $A_{m,n}$ 、 $a_{m,n}$; $K_{m,n}$ 为方位向第m个、距离向第n个子阵天线的天线阵元数,且 $K_{m,n} \in [3, 10]$; d_n 为第n个距离向子阵沿方位向的距离偏移量,且 $d_n \in [0, 10\lambda_c]$, λ_c 为工作中心频率对应的波长; $A_{m,n}$ 与 $a_{m,n}$ 分别为方位向第m个、距离向第n个子阵天线的幅度值与相位值; $P_{SL}(\cdot)$ 为求取天线方向图最大副瓣电平的函数;

[0072] 利用并行遗传算法对加权组合后的目标函数 $f(K_{m,n}, d_n, A_{m,n}, a_{m,n})$ 进行搜索优化,获得多目标函数变量的最优值 $\text{opt}\{K_{m,n}\}$ 、 $\text{opt}\{d_n\}$ 、 $\text{opt}\{A_{m,n}\}$ 、 $\text{opt}\{a_{m,n}\}$,获得各个子阵天线的阵元数 $\text{opt}\{K_{m,n}\}$ 与距离向的偏移量 $\text{opt}\{d_n\}$,完成非均匀子阵式多通道天线20布阵。

[0073] 直射干扰信号抑制优化30包括:干扰零陷多目标函数模型构建301,即建立直射干扰信号抑制优化多目标函数,对P个导航卫星直射干扰信号实现抑制深度最大化,使整个天线方向图满足总增益最大、天线主瓣宽度最小、天线副瓣电平最小;并行遗传算法优化B302,即对直射干扰信号抑制优化多目标函数进行搜索优化,获得各个子阵天线的最优复数权值,实现对P个直射干扰信号的深度抑制。

[0074] 在具体的直射干扰信号抑制优化多目标函数建模与搜索优化中,根据多颗导航卫星位置与速度、星载GNSS-S雷达位置与速度、天线安装角等信息,计算多颗导航卫星的直射干扰信号的角度,探测海面舰船时被P颗导航卫星的信号造成直射干扰,以天线法线方向为参考,计算出第p颗导航卫星的直射干扰信号角度 $(\theta_{s_p}, \varphi_{s_p})$ 。

[0075] 根据多颗导航卫星位置与速度、星载GNSS-S雷达位置与速度、天线安装角等信息,计算多颗导航卫星的直射干扰信号的功率,计算出第p颗导航卫星的直射干扰信号功率 P_{s_p} 。

[0076] 根据双站雷达方程,计算出星载GNSS-S雷达对最小可检测舰船目标的回波功率 $P_{t_{\min}}$,与每颗导航卫星直射干扰信号功率满足 $P_{t_{\min}} \geq P_{s_p} - G_{y_p}$, $p=1, 2, \dots, P$,其中, G_{y_p} 为天线对第p颗导航卫星直射干扰信号的抑制深度;P为直射干扰信号的导航卫星总数。第p颗导

航卫星直射干扰信号的抑制宽度在方位向满足 $\Delta \Phi_p \in [\Phi_0, 2\Phi_0]$, 在距离向满足 $\Delta \Theta_p \in [\Theta_0, 2\Theta_0]$ 。

[0077] 优化搜索各天线子阵的加权幅度 $A_{1_{m,n}}$ (最优化幅度) 与相位 $a_{1_{m,n}}$, 使 P 个导航卫星直射干扰信号的抑制深度最大化, 使整个天线方向图满足总增益最大、天线主瓣宽度最小、天线副瓣电平最小, 则直射干扰信号抑制优化多目标函数为:

$$[0078] \quad \begin{cases} g_1 = \max\{G\} \\ g_2 = \min\{\Phi\} \\ g_3 = \min\{\Theta\} \\ g_4 = \min\{\max\{P_{SL}(F(\varphi, \theta |_{\varphi_s, \theta_s}))\}\} \\ g_5 = \max_{\varphi, \theta} \left\{ \sum_{p=1}^P G \gamma_p \right\}, \varphi \in [\varphi_{s_p} - \Delta\Phi_p / 2, \varphi_{s_p} + \Delta\Phi_p / 2], \theta \in [\theta_{s_p} - \Delta\Theta_p / 2, \theta_{s_p} + \Delta\Theta_p / 2] \end{cases} ;$$

[0079] 经过加权组合后的目标函数为:

$$[0080] \quad g(A_{1_{m,n}}, a_{1_{m,n}}) = -\gamma_1 \cdot g_1 + \gamma_2 \cdot g_2 + \gamma_3 \cdot g_3 + \gamma_4 \cdot g_4 - \gamma_5 \cdot g_5;$$

[0081] 其中, $\sum_{i=1}^5 \gamma_i = 1$, 且 $\gamma_1 \in [0.2, 0.3]$, $\gamma_2 \in [0.1, 0.2]$, $\gamma_3 \in [0.1, 0.2]$, $\gamma_4 \in [0.35, 0.5]$, $\gamma_5 \in [0.35, 0.5]$;

[0082] 使天线副瓣电平最小化函数与直射干扰信号抑制深度最大化函数占比更大。

[0083] 利用并行遗传算法对加权组合后的目标函数 $g(A_{1_{m,n}}, a_{1_{m,n}})$ 进行搜索优化, 获得多目标函数变量的最优值 $\text{opt}\{A_{1_{m,n}}\}$ 、 $\text{opt}\{a_{1_{m,n}}\}$, 将天线的 $M \times N$ 个子阵天线输出的信号 $s_{m,n}(t)$ 进行复数加权后, 实现数字波束合成, $\overline{S(t)} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N A_{1_{m,n}} \cdot s_{m,n}(t) \cdot e^{-j a_{1_{m,n}}}$; $\overline{S(t)}$ 为数字波束形成

后的回波信号; e 为自然对数函数的底数; $j = \sqrt{-1}$, 从而抑制了 P 颗导航卫星直射干扰信号功率。

[0084] 对不同波束指向的探测区域, 调整波束中心指向角度, 利用并行遗传算法重复对上述直射干扰信号抑制优化多目标函数进行搜索优化, 获得不同波束指向的最优化复数权值, 实现大范围海面舰船目标探测时的 P 颗导航卫星直射干扰信号深度抑制。

[0085] 参见图2, 非均匀子阵式多通道天线20包括: $M \times N$ 个非均匀子阵天线201, 用于以宽波束对大区域海面舰船目标的散射信号进行接收, 实现大范围海面舰船目标探测, 即, 在方位向与距离向分别包括 M 个子阵天线与 N 个阵元, 对应 $M \times N$ 个接收通道, 每个接收通道均为宽波束, 每个子阵天线的阵元数为 $K_{m,n}$ (即方位向第 m 个、距离向第 n 个子阵天线的天线阵元数), 取3-10, 距离向第 n 个阵元位置相对于距离向第1个阵元的位置偏移为 d_n ; 数字接收组件202, 用于对子阵天线输出的GNSS-S信号进行低噪声放大、带通滤波、下变频、中频放大、中频信号采样量化, 获得数字域中频GNSS-S信号, 方位向第 m 个、距离向第 n 个数字域中频GNSS-S信号为 $s_{m,n}(t)$, t 为快时间变量。

[0086] 非均匀子阵式多通道天线20在方位向采用非均匀子阵式相控阵天线技术, 以减少方位向接收组件与射频电缆数量, 方位向共含有 M 个子阵天线, 每个子阵天线对应一个接收组件; 在距离向采用全数字阵列天线技术, 以实现大范围海面舰船目标散射信号高效接收, 距离向共含有 N 个天线阵元, 每个天线阵元对应一个接收组件。非均匀子阵式多通道天线20

工作频率范围为1.17GHz-1.29GHz,极化方式为左旋圆极化,天线总增益大于30dB。

[0087] 最优化数字波束形成器40包括:N个方位向数字波束形成器401,用于对距离向每行输出的数字域中频GNSS-S信号进行方位向复数加权,第n个方位向数字波束形成器401的

输出为 $\overline{S_n(t)} = \sum_{m=1}^M s_{m,n}(t) \cdot A1_{m,n} \cdot e^{-j \cdot a1_{m,n}}$;距离向数字波束形成器402,用于对距离向的GNSS-S信号

进行复数加权,即 $\overline{S(t)} = \sum_{n=1}^N \overline{S_n(t)}$;M×N个复数权值 $A1_{m,n}$ 、 $a1_{m,n}$ 通过多目标函数建模与遗传算法搜索优化得到最优值 $\text{opt}\{A1_{m,n}\}$ 、 $\text{opt}\{a1_{m,n}\}$,实现对多颗导航卫星直射干扰信号的深度抑制,其中, $\overline{S_n(t)}$ 为第n个方位向数字波束形成输出的回波信号。

[0088] 参见图3,星载GNSS-S雷达的轨道高度为H,非均匀子阵式多通道天线20以正侧视模式工作,实现大区域海面舰船目标的散射信号接收,M×N个子阵天线均为宽波束;大区域海面被Q个导航卫星照射作为散射源,形成Q个双站雷达;被P个导航卫星信号直射作为干扰源;利用数字波束形成对M×N个通道输出的GNSS-S信号进行波束形成,获得K个数字子波束,第k个数字子波束对应的幅宽为 W_k ,探测总幅宽为 $W_s = \sum_{k=1}^K W_k$ 。

束,第k个数字子波束对应的幅宽为 W_k ,探测总幅宽为 $W_s = \sum_{k=1}^K W_k$ 。

[0089] 参见图4,星载GNSS-S雷达天线以正侧视工作模式对大区域海面舰船目标的散射信号进行接收,同时被P颗导航卫星直射信号干扰。第p颗导航卫星的直射干扰信号入射角与天线波束中心入射角的夹角为 θ_{s_p} ,第p颗导航卫星干扰源与星载GNSS-S雷达天线的间距为 Rt_p ,到达天线处的功率为 Ps_p 。

[0090] 参见图5,第p颗导航卫星的直射干扰信号方位角与天线波束中心方位角的夹角为 φ_{s_p} ,天线以正侧视工作模式对海面舰船目标散射信号进行接收,天线波束中心的方位角为 0° 。

[0091] 参见图6,非均匀子阵式多通道天线20以正侧视工作模式接收海面舰船目标散射信号,导航卫星的直射干扰信号仅从一侧进入,即 $\theta > 0^\circ$ 的一侧,即可得出非均匀子阵式多通道天线对P个直射干扰抑制区的角度分布关系。数字波束形成后,天线主瓣在方位向与距离向均呈现窄波束,在距离向形成多个数字子波束,以实现大区域海面舰船目标的散射信号接收。

[0092] 综上所述,本发明的星载GNSS-S雷达的大区域舰船信号接收与直射干扰抑制方法,利用非均匀子阵式多通道天线对大范围海面舰船目标的弱散射信号进行同步接收,利用多目标函数建模与并行遗传算法对多通道信号的复数权值进行搜索优化,实现最优化数字波束形成,对多颗导航卫星直射干扰信号进行深度抑制,提高海面舰船目标散射信号的信杂比。同时,采用非均匀子阵式多通道天线优化技术,从而在保证方位向波束扫描性能要求下,大幅降低了天线的接收通道数量,简化了星载GNSS-S雷达系统复杂度,具有接收通道数少、系统复杂度低、功耗低等优势。

[0093] 以上所述仅为本发明的一个实施方式而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包括在本发明的保护范围之内。

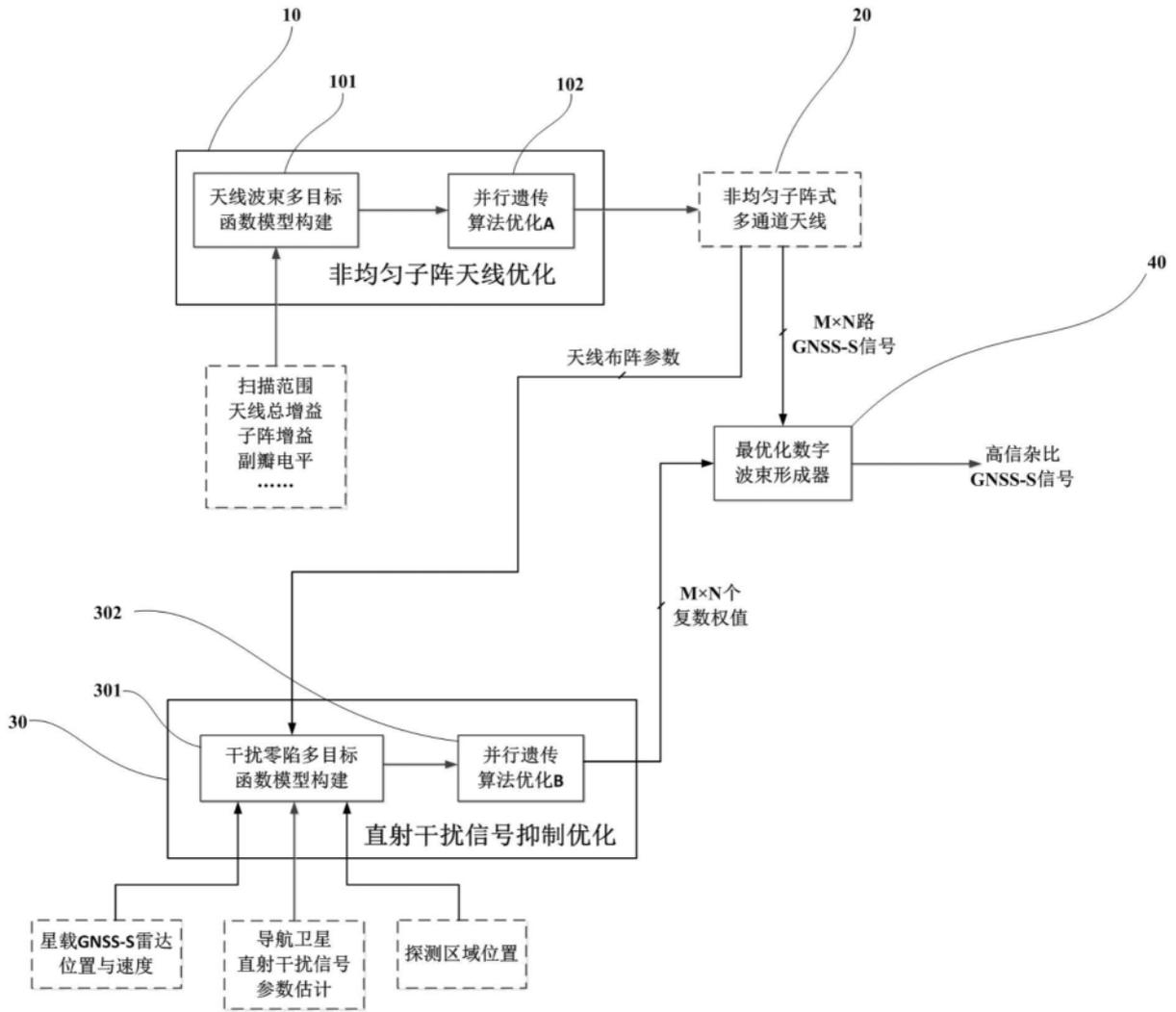


图1

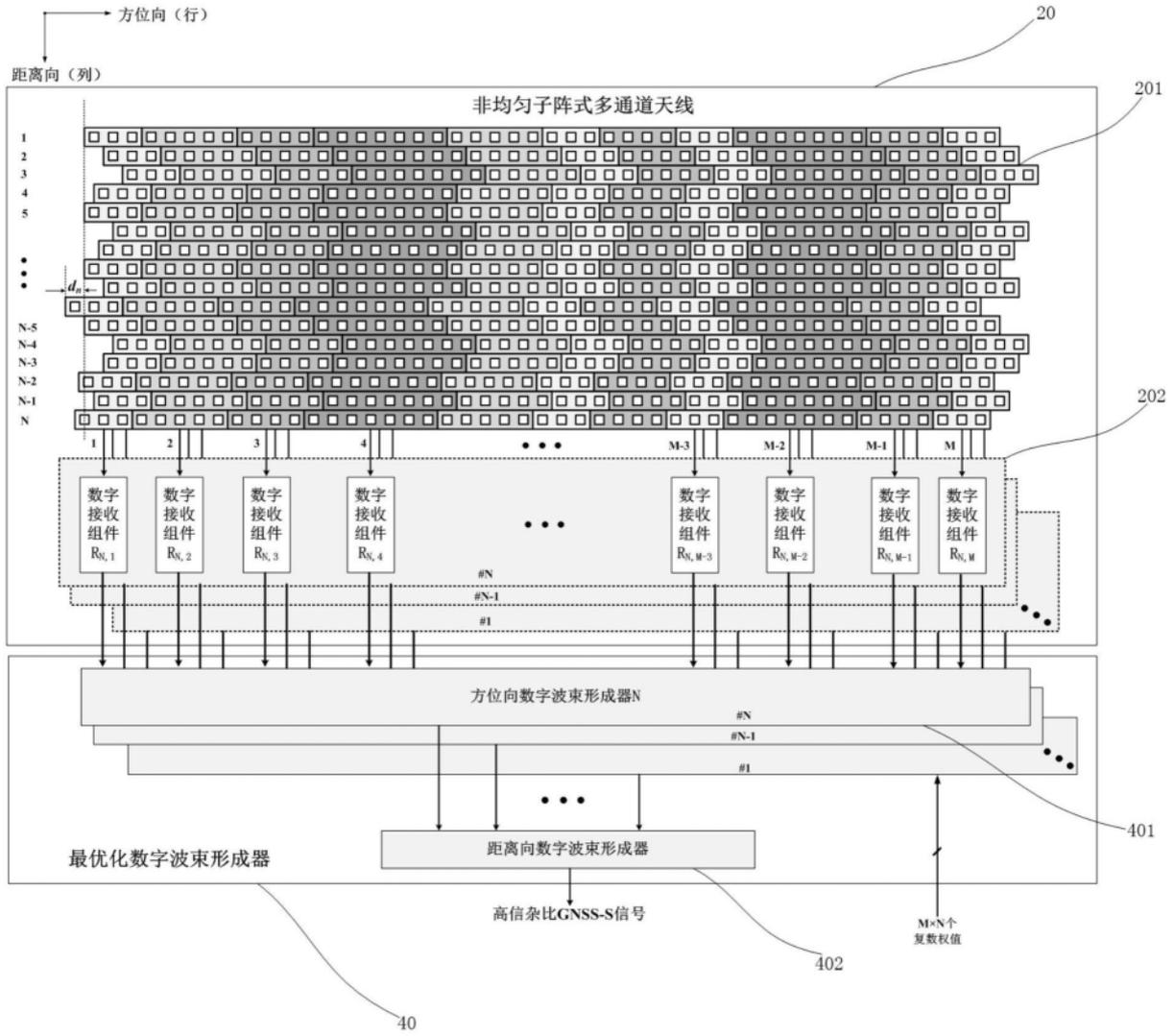


图2

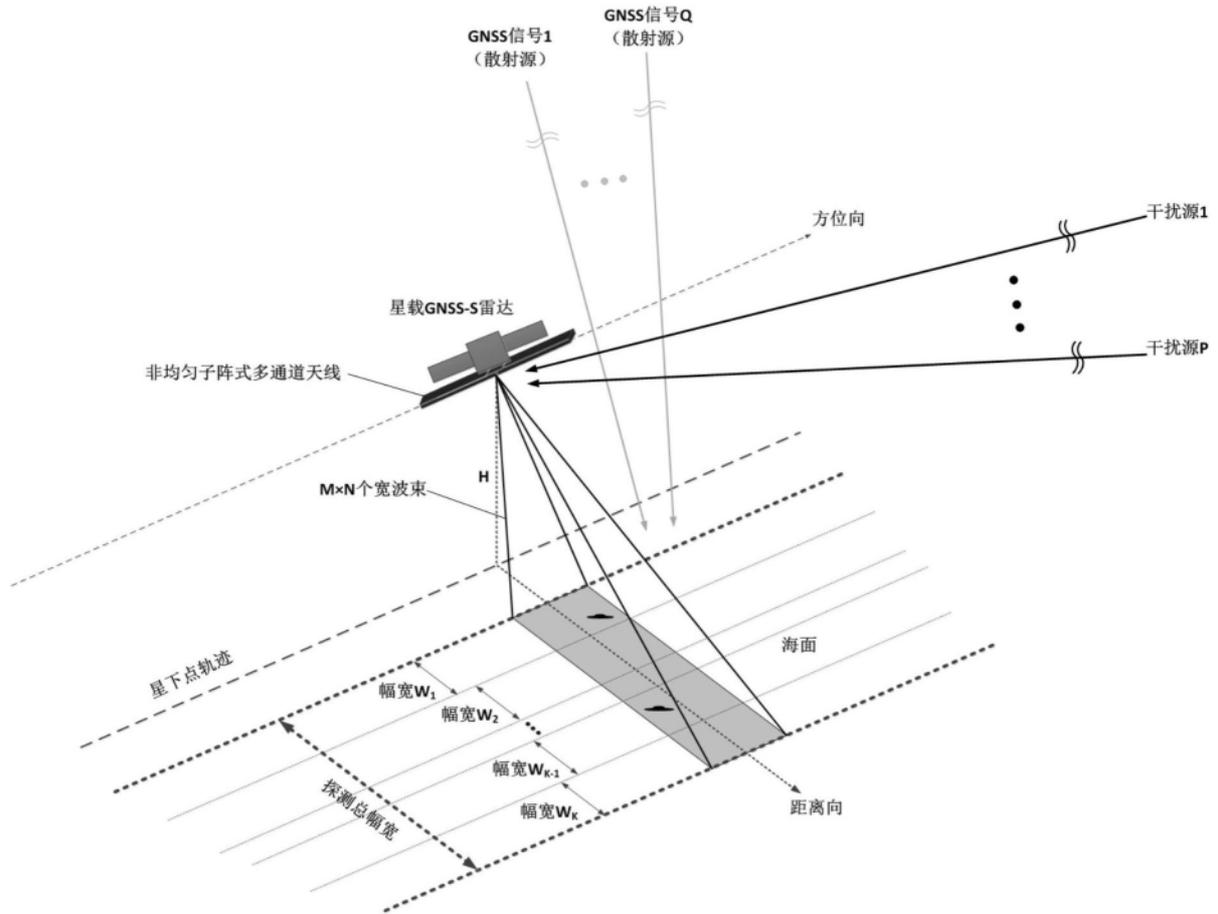


图3

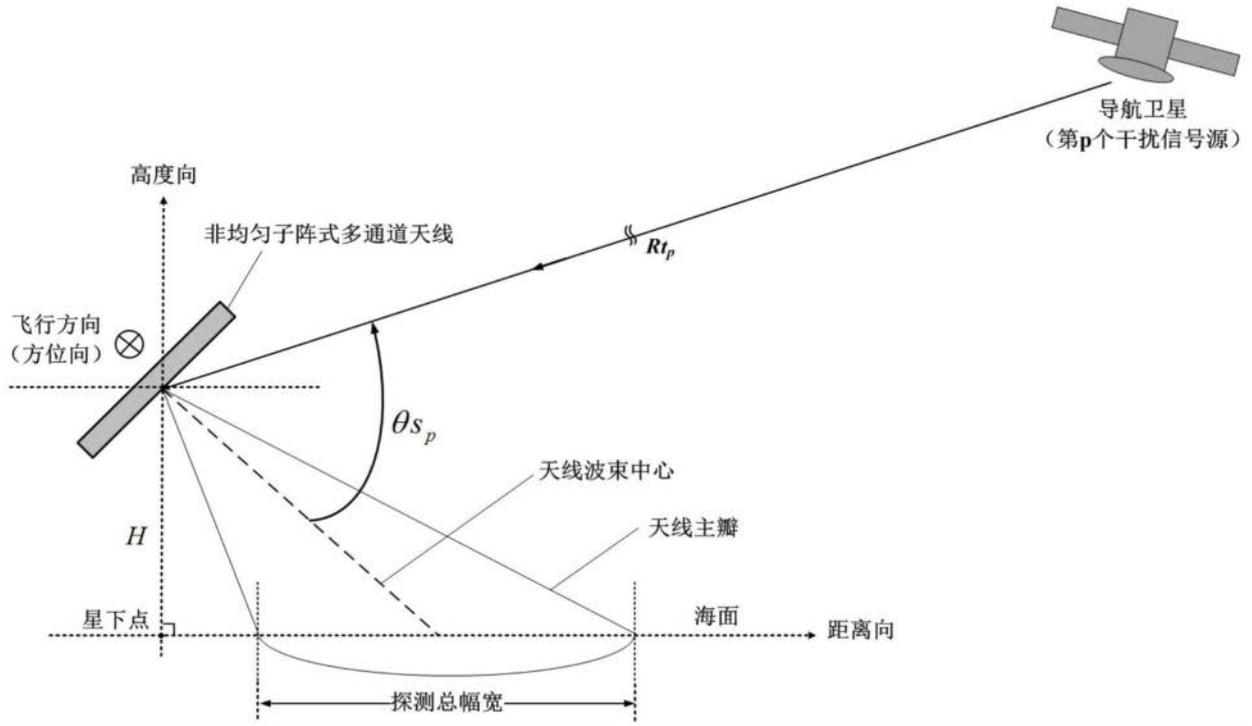


图4

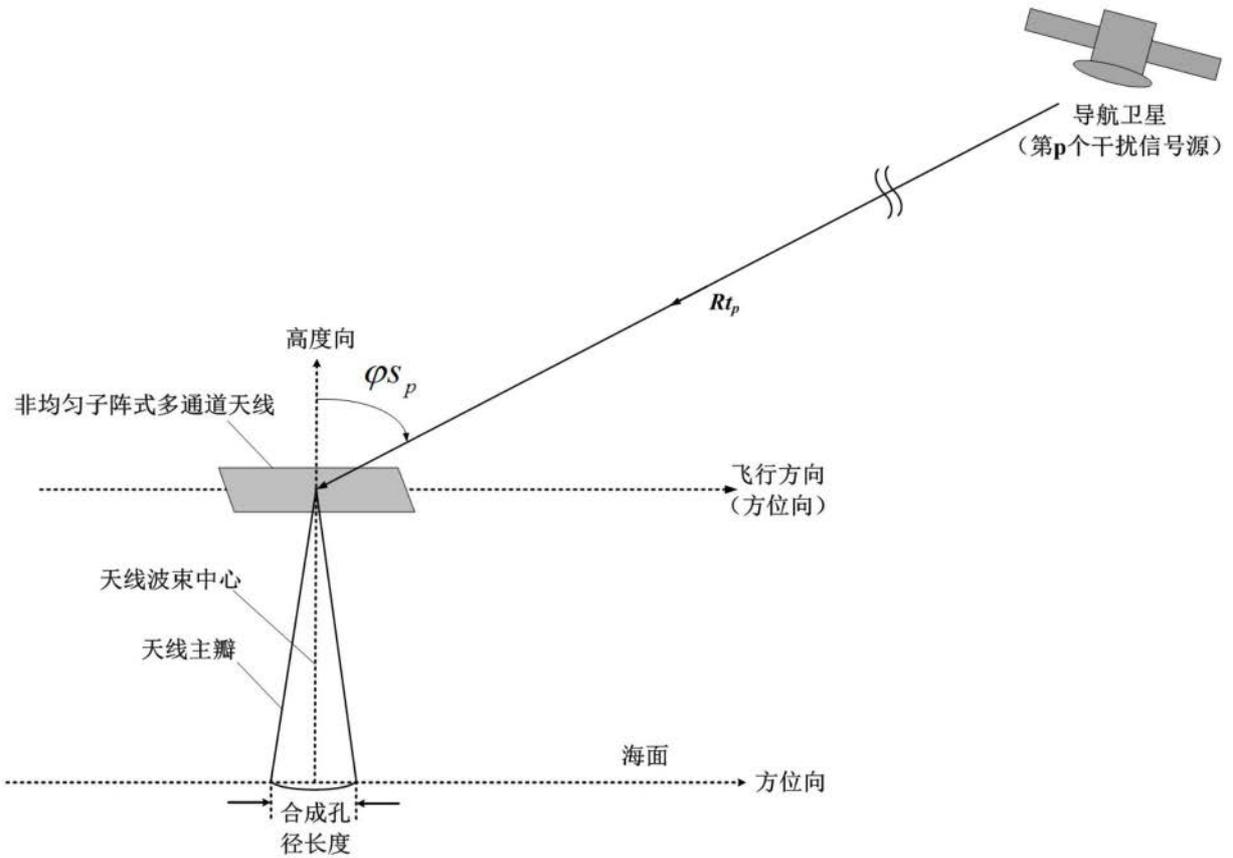


图5

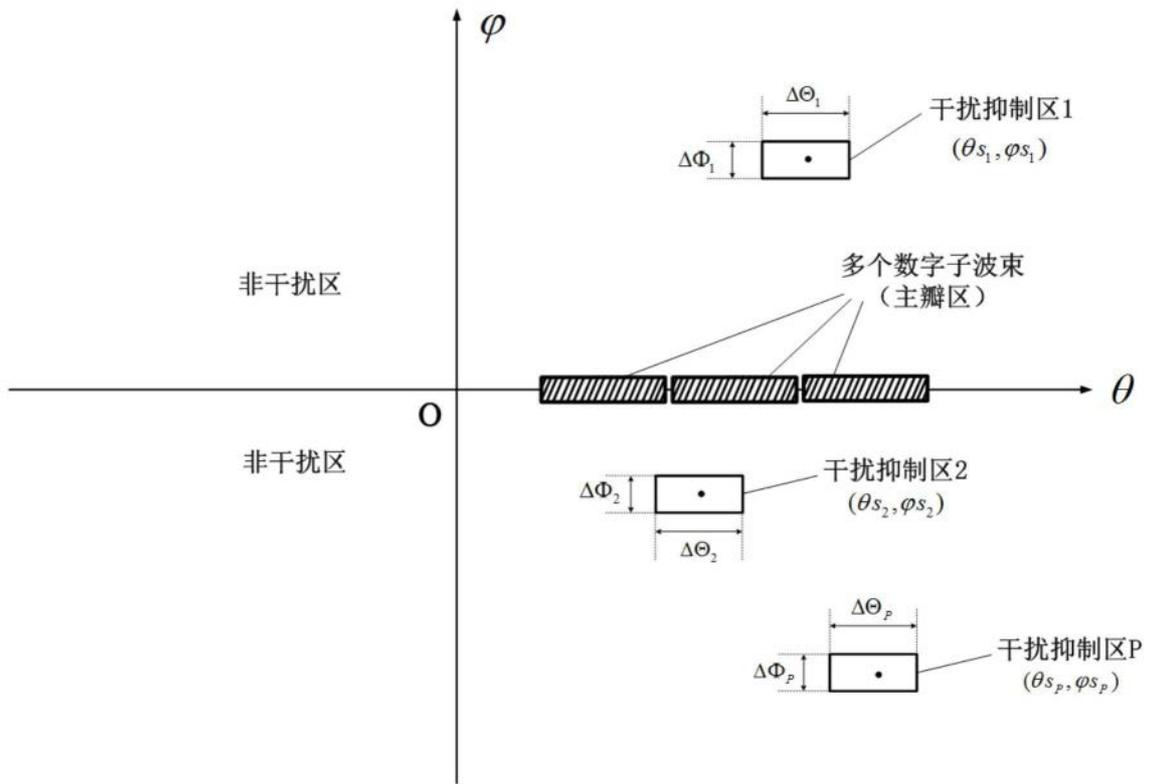


图6