

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2015 年 7 月 30 日 (30.07.2015)



(10) 国际公布号
WO 2015/109869 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01S 3/14 (2006.01) G01S 7/02 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2014/088099
- (22) 国际申请日: 2014 年 10 月 3 日 (03.10.2014)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201410033733.5 2014 年 1 月 24 日 (24.01.2014) CN
- (71) 申请人: 深圳大学 (SHENZHEN UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国广东省深圳市南山南海大道 3688 号
信息工程学院 8 楼谢宁, Guangdong 518060 (CN)。
- (72) 发明人: 及
- (71) 申请人: 谢宁 (XIE, Ning) [CN/CN]; 中国广东省深
圳市南山南海大道 3688 号信息工程学院 8 楼,
Guangdong 518060 (CN)。郭伟斌 (GUO, Weibin)
[CN/CN]; 中国广东省深圳市南山南海大道 3688 号

信息工程学院 8 楼, Guangdong 518060 (CN)。王晖 (WANG, Hui) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山南海大道 3688 号信息工程学院 8 楼, Guangdong 518060 (CN)。林晓辉 (LIN, Xiaohui) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山南海大道 3688 号信息工程学院 8 楼, Guangdong 518060 (CN)。曾捷 (ZENG, Jie) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山南海大道 3688 号信息工程学院 8 楼, Guangdong 518060 (CN)。

- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

[见续页]

(54) Title: HIGH RESOLUTION DOA ESTIMATION METHOD AND SYSTEM

(54) 发明名称: 高分辨率 DOA 估计方法及系统

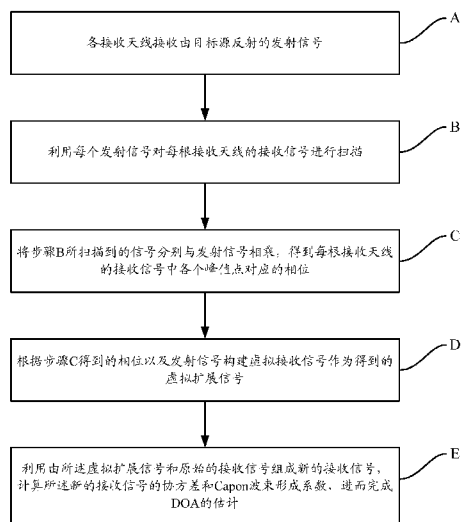


图 1 / FIG. 1

- A ALL RECEIVE ANTENNAS RECEIVE TRANSMITTED SIGNALS REFLECTED BY TARGET SOURCES
- B SCAN A RECEIVED SIGNAL OF EACH RECEIVE ANTENNA BY USING EACH TRANSMITTED SIGNAL
- C SEPARATELY MULTIPLY THE SIGNAL SCANNED IN STEP B BY THE TRANSMITTED SIGNAL TO OBTAIN A PHASE CORRESPONDING TO EACH PEAK SIGNAL IN THE RECEIVED SIGNAL OF EACH RECEIVE ANTENNA
- D CONSTRUCT A VIRTUAL RECEIVED SIGNAL ACCORDING TO THE PHASE OBTAINED IN STEP C AND THE TRANSMITTED SIGNAL TO SERVE AS AN OBTAINED VIRTUAL EXTENDED SIGNAL
- E FORM A NEW RECEIVED SIGNAL BY THE VIRTUAL EXTENDED SIGNAL AND THE ORIGINAL RECEIVED SIGNAL, AND CALCULATE A COVARIANCE AND A CAPON BEAMFORMING COEFFICIENT OF THE NEW RECEIVED SIGNAL, SO AS TO COMPLETE DOA ESTIMATION

(57) Abstract: The present invention applies to the technical field of MIMO radars. A high resolution DOA estimation method and system. The method comprises the following steps: all receive antennas receiving transmitted signals reflected by target sources (A); scanning a received signal of each receive antenna by using each transmitted signal (B); separately multiplying the scanned signal by the transmitted signal to obtain a phase corresponding to each peak signal in the received signal of each receive antenna (C); constructing a virtual received signal according to the obtained phase and the transmitted signal to serve as an obtained virtual extended signal (D); and forming a new received signal by the virtual extended signal and the original received signal, and calculating a covariance and a Capon beamforming coefficient of the new received signal, so as to complete DOA estimation (E). By means of the method, the estimation accuracy is improved and the number of target sources that can be estimated is increased without adding antennas.

(57) 摘要: 一种高分辨率 DOA 估计方法及系统, 适用于 MIMO 雷达技术领域。该方法包括下述步骤: 各接收天线接收由目标源反射的发射信号 (A); 利用每个发射信号对每根接收天线的接收信号进行扫描 (B); 将所扫描到的信号分别与发射信号相乘, 得到每根接收天线的接收信号中各个峰值点对应的相位 (C); 根据得到的相位以及发射信号构建虚拟接收信号作为得到的虚拟扩展信号 (D); 利用由所述虚拟扩展信号和原始的接收信号组成新的接收信号, 计算所述新的接收信号的协方差和 Capon 波束形成系数, 进而完成 DOA 的估计 (E)。本方法在不增加天线的情况下, 使估计精度和可以估计的目标源个数得到提高。

WO 2015/109869 A1



(84) **指定国** (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ,

CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

高分辨率 DOA 估计方法及系统

技术领域

Technical Field

- [1] 本发明属于无线通信技术领域，尤其涉及一种适用于 MIMO 雷达系统的高分辨率 DOA 估计方法及系统。

背景技术

Background Art

- [2] MIMO 雷达利用多天线技术同时发射独立的信号波束来探测目标，并接收相应的目标发射信号。发射信号中承载着有关发射目标的信息，如角度、距离、多普勒平移等等，这些信息都可以利用匹配滤波器的方法在接收端提取出来。MIMO 雷达可以灵活采用新一代雷达系统的高带宽、双程数字波束合成和波形分集技术，同时要求各天线发射相互正交的信号，其天线阵列的各个阵元在空间分置一定的间隔，对空间目标形成空间分集，可以提高对空中目标的检测能力。MIMO 雷达中的发射信号的特点以及空间分集的设计提高了 DOA 估计方法的分辨率。
- [3] 已有的应用于 MIMO 雷达中的 DOA 估计算法主要有：多信号分类 (MUSIC) 方法、Capon 方法、幅度和相位估计 (APES) 方法、最大似然比测试 (GLRT) 方法。这些算法本身可以都可以应用到 MIMO 雷达中的 DOA 估计，在一定程度上 (如发射天线和接收天线根数较多，采样点个数大的情形) 可以提供比较高的 DOA 分辨率，但是这些方法的缺点主要有：(1) 可以估计的目标源个数都受到一定的限制，尤其是在发射天线和接收天线根数较少的情况下，其可以估计的目标源个数依赖与发射阵列和接收阵列的可以共享的天线根数，已有方法的 DOA 估计算法可以估计的目标源个数最大值为

$$\frac{2M_t N_r}{3}$$

，其中 M_t 表示的发射天线根数， N_r 表示接收天线根数；(2) 算法在发射天线

和接收天线根数较少时，估计性能不稳定，精度不够高，分辨率能力不强。

对发明的公开

技术问题

Technical Problem

- [4] 本发明所要解决的第一个技术问题在于提供一种 高分辨率 DOA 估计方法，旨在不增加现有接收天线和发射天线的情况下提高天线的自由度，从而提高 DOA 估计的分辨率以及可以估计的目标源个数。

问题的解决方案

Technical Solution

- [5] 本发明是这样实现的，一种 高分辨率 DOA 估计方法，所述方法包括下述步骤：
- [6] 步骤 A，各接收天线接收由目标源反射的发射信号；
- [7] 步骤 B，利用每个发射信号对每根接收天线的接收信号进行扫描；
- [8] 步骤 C，将步骤 B 所扫描到的信号分别与发射信号相乘，得到每根接收天线的接收信号中各个峰值点对应的相位；
- [9] 步骤 D，根据步骤 C 得到的相位以及发射信号构建虚拟扩展信号；
- [10] 步骤 E，利用由所述虚拟扩展信号和原始的接收信号组成新的接收信号，计算所述新的接收信号的协方差和 Capon 波束形成系数，进而完成 DOA 的估计。
- [11] 本发明所要解决的第二个技术问题在于提供一种高分辨率 DOA 估计系统，包括：
- [12] 扫描模块，用于利用每个发射信号对每根接收天线的接收信号进行扫描；所述发射信号由目标源反射；
- [13] 相位计算模块，用于将扫描到的信号分别与发射信号相乘，得到每根接收天线的接收信号中各个峰值点对应的相位；
- [14] 虚拟扩展信号构建模块，用于根据所述相位计算模块得到的相位以及发射信号构建虚拟扩展信号；
- [15] 估计模块，用于将所述虚拟扩展信号和接收信号组成新的接收信号，计算所述

新的接收信号的协方差和 Capon 波束形成系数，进而完成 DOA 的估计。

发明的有益效果

Advantageous Effects

- [16] 本发明与现有技术相比，充分利用了 MIMO 雷达中发射波形的相互正交的特点以及空间分集的设计，对接收信号进行匹配滤波恢复信号，然后进行信号的虚拟扩展。从而在不增加天线的情况下，提高了天线的自由度（主要是相当于增加了实际的接收天线根数），因此提高了估计精度和可以估计的目标源个数。可以估计的目标源个数大于原始方法的极限值

$$\frac{2M_t N_r}{3}$$

（其中， M_t 为发射天线根数、 N_r 为接收天线根数）。

对附图的简要说明

Description of Drawings

- [17] 图 1 是本发明提供的高分辨率 DOA 估计方法的实现流程图；
- [18] 图 2 是本发明提供的在现有的 capon 估计方法和本发明天提供的估计方法之间选择的实现流程图；
- [19] 图 3A、3B、3C 是在采样点个数 $L=2^7$ 、信噪比 $SNR=0dB$ 的情况下，分别采用原始 capon 方法、实际增加天线 capon 方法、本发明提供的估计方法得到的 DOA 估计图；
- [20] 图 4A、4B、4C 是在采样点个数 $L=2^7$ 、信噪比 $SNR=20dB$ 的情况下，分别采用原始 capon 方法、实际增加天线 capon 方法、本发明提供的估计方法得到的 DOA 估计图；
- [21] 图 5A、5B、5C 是在采样点个数 $L=2^{10}$ 、信噪比 $SNR=0dB$ 的情况下，分别采用原始 capon 方法、实际增加天线 capon 方法、本发明提供的估计方法得到的 DOA 估计图；
- [22] 图 6A、6B、6C 是在采样点个数 $L=2^{10}$ 、信噪比 $SNR=20dB$ 的情况下，分别采用原始 capon 方法、实际增加天线 capon 方法、本发明提供的估计方法得到的 DOA 估计图；

- [23] 图 7A、7B 分别是在采样点个数 $L=2^7$ 和采样点个数 $L=2^{10}$ 的情况下, 采用原始 capon 方法、实际增加天线 capon 方法、本发明提供的估计方法的估计角度均方根误差 RMSE 随 SNR 的变化比较示意图;
- [24] 图 8A、8B 分别是在 $\text{SNR}=0\text{dB}$ 和 $\text{SNR}=20\text{dB}$ 的情况下, 采用原始 capon 方法、实际增加天线 capon 方法、本发明提供的估计方法时 RMSE 随采样点个数的变化比较示意图;
- [25] 图 9A、9B 分别是在采样点个数 $L=2^7$ 和 $\text{SNR}=0\text{dB}$ 的情况下, 采用原始 capon 方法、实际增加天线 capon 方法、本发明提供的估计方法时 RMSE 随目标源个数的变化比较示意图;
- [26] 图 10A、10B 分别是在采样点个数 $L=2^{10}$ 和 $\text{SNR}=0\text{dB}$ 的情况下, 采用原始 capon 方法、实际增加天线 capon 方法、本发明提供的估计方法时 RMSE 随目标源个数的变化比较示意图。

发明实施例

Mode for Invention

- [27] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白, 以下结合附图及实施例, 对本发明进行进一步详细说明。应当理解, 此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明, 并不用于限定本发明。
- [28] 在 MIMO 雷达中, 发射信号可以表示为:

$$x_i(t) = w_i(t) * s_i(t)$$

- [29] (1)
- [30] 其中 $i=\{1, \dots, M_i\}$ 表示发射天线数, w_i 表示哈达玛矩阵的第 i 列, s_i 表示由等概率分布 -1 和 1 组成的实数随机矩阵的第 i 列, t 表示时间。MIMO 雷达中发射波形之间相互正交且独立, 因此存在:

$$\int_0^T x(t - \tau_1) \cdot x^*(t - \tau_2) dt / T = \begin{cases} 1, & \tau_1 \neq \tau_2 \\ \varepsilon, & \tau_1 = \tau_2 \end{cases}$$

(2)

[31] 其中 T 表示发射信号的周期,

$$\tau_1, \tau_2$$

表示时间延迟,

$$\varepsilon$$

是一个很小的数值, 当采样点个数 $L=512$ 时,

$$\varepsilon$$

接近 0.1, 且随着采样点个数越大

$$\varepsilon$$

越小, 本发明就充分利用这一点对信号进行匹配恢复。为了说明具体步骤, 下文以发射天线根数 $M_t=1$, 接收天线根数 $N_r=2$, 目标源个数 $K=2$ 为实例进行说明。

[32] 图 1 示出了本发明提供的高分辨率 DOA 估计方法的实现流程, 详述如下。

[33] 步骤 A, 各接收天线接收由目标源反射的发射信号。

[34] 接收天线接收信号, 且每根接收天线接收的信号为一个采样点为 L 的行向量信号。

[35] 步骤 B, 利用发射信号对每根接收天线的接收信号进行扫描。

[36] 本发明利用发射波形之间的相关性的特点, 用发射信号对每根接收天线的接收信号进行扫描;

[37] 在第 m 个脉冲, 经过目标反射后到达接收天线的接收信号可以表示为:

$$[38] \quad y_{1m}(t) = \beta_1 x(t - (d'_{11}(t) + d''_{11}(t)) / c) \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{11}(t) + d''_{11}(t)) / c) \\ + \beta_2 x(t - (d'_{12}(t) + d''_{12}(t)) / c) \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{12}(t) + d''_{12}(t)) / c) + n_1(t) \\ (3)$$

$$[39] \quad y_{2m}(t) = \beta_1 x(t - (d'_{11}(t) + d''_{21}(t)) / c) \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{11}(t) + d''_{21}(t)) / c) \\ + \beta_2 x(t - (d'_{12}(t) + d''_{22}(t)) / c) \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{12}(t) + d''_{22}(t)) / c) + n_2(t)$$

(4)

[40] 其中 c , f 和

$$\beta_k$$

分别表示光速, 载波频率和第 k 个目标源的反射系数。 $d_k(0)$ 表示第 k 个目标源初始时刻到原点的距离, $d_{mk}^u(t)$ 表示第 m 个发射 / 接收天线到第 k 个目标源之间的距离。 $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 表示 2 根接收天线的接收的噪声信号, 且均值和方差相等。假设发射波形为窄带信号, 目标相对移动缓慢, 则接收信号中接收到的由于目标导致的延迟都相同为 $2d_k(0)/c$, 因此接收信号可以简化为:

$$\begin{aligned} [41] \quad y_{1m}(t) &\approx \beta_1 x(t - 2d_1(0)/c) \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{11}(t) + d''_{11}(t))/c) \\ &\quad + \beta_2 x(t - 2d_2(0)/c) \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{12}(t) + d''_{12}(t))/c) + n_1(t) \end{aligned}$$

(5)

$$\begin{aligned} [42] \quad y_{2m}(t) &\approx \beta_1 x(t - 2d_1(0)/c) \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{11}(t) + d''_{21}(t))/c) \\ &\quad + \beta_2 x(t - 2d_2(0)/c) \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{12}(t) + d''_{22}(t))/c) + n_2(t) \end{aligned}$$

(6)

[43] 为了简化公式 (5) 和 (6), 做如下假设:

$$\begin{aligned} [44] \quad x_1(t) &= x(t - 2d_1(0)/c) \\ x_2(t) &= x(t - 2d_2(0)/c) \end{aligned}$$

(7)

$$\begin{aligned} [45] \quad \gamma_{11} &= \beta_1 \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{11}(t) + d''_{11}(t))/c) \\ \gamma_{12} &= \beta_2 \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{12}(t) + d''_{12}(t))/c) \\ \gamma_{21} &= \beta_1 \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{11}(t) + d''_{21}(t))/c) \\ \gamma_{22} &= \beta_2 \cdot \exp(-j2\pi f(d'_{12}(t) + d''_{22}(t))/c) \end{aligned}$$

(8)

[46] 所有目标源的反射系数相等, 即

$$\beta_1 = \beta_2 = 1$$

。则公式 (5) 和 (6) 可以简化为:

[47]

$$y_{1m}(t) = \gamma_{11}x_1(t) + \gamma_{12}x_2(t) + n_1(t)$$

(9)

[48]

$$y_{2m}(t) = \gamma_{21}x_1(t) + \gamma_{22}x_2(t) + n_2(t)$$

(10)

[49] 利用信号的相关性的特点, 因为

 ε

是一个很小的值, 当采样点个数很大时这个值小于 0.1。为了说明的方便, 定义一个

 ε'

表示发射波形和噪声之间的互相关系数, 在 SNR=0dB 时, 这个值接近 0.1。充分利用上述特点, 可以对

 γ_{ij}

进行恢复:

[50]

$$\begin{aligned}\hat{\gamma}_{11} &= \frac{1}{T} \int_0^T x_1^*(t) y_{1m}(t) dt \\ &= \frac{\gamma_{11}}{T} \int_0^T x_1^*(t) \cdot x_1(t) dt + \frac{\gamma_{12}}{T} \int_0^T x_1^*(t) \cdot x_2(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T x_1^*(t) \cdot n_1(t) dt \\ &= \gamma_{11} + \tilde{\gamma}_{11}\end{aligned}$$

(11)

$$\begin{aligned}
[51] \quad \hat{\gamma}_{12} &= \frac{1}{T} \int_0^T x_2^*(t) \cdot y_{1m}(t) dt \\
&= \frac{\gamma_{11}}{T} \int_0^T x_2^*(t) \cdot x_1(t) dt + \frac{\gamma_{12}}{T} \int_0^T x_2^*(t) \cdot x_2(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T x_2^*(t) \cdot n_1(t) dt \\
&= \gamma_{12} + \tilde{\gamma}_{12}
\end{aligned}$$

(12)

$$\begin{aligned}
[52] \quad \hat{\gamma}_{21} &= \frac{1}{T} \int_0^T x_1^*(t) \cdot y_{2m}(t) dt \\
&= \frac{\gamma_{21}}{T} \int_0^T x_1^*(t) \cdot x_1(t) dt + \frac{\gamma_{22}}{T} \int_0^T x_1^*(t) \cdot x_2(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T x_1^*(t) n_2(t) dt \\
&= \gamma_{21} + \tilde{\gamma}_{21}
\end{aligned}$$

(13)

$$\begin{aligned}
[53] \quad \hat{\gamma}_{22} &= \frac{1}{T} \int_0^T x_2^*(t) \cdot y_{2m}(t) dt \\
&= \frac{\gamma_{21}}{T} \int_0^T x_1(t) \cdot x_2^*(t) dt + \frac{\gamma_{22}}{T} \int_0^T x_2^*(t) \cdot x_2(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T x_2^*(t) n_2(t) dt \\
&= \gamma_{22} + \tilde{\gamma}_{22}
\end{aligned}$$

(14)

[54] 其中估计误差为：

$$\tilde{\gamma}_{11} = \varepsilon \gamma_{12} + \varepsilon' \sigma_1, \tilde{\gamma}_{12} = \varepsilon \gamma_{11} + \varepsilon' \sigma_1, \tilde{\gamma}_{21} = \varepsilon \gamma_{21} + \varepsilon' \sigma_2, \tilde{\gamma}_{22} = \varepsilon \gamma_{21} + \varepsilon' \sigma_2$$

。

[55] 进一步地，如图 2 所示，还包括在现有的 capon 估计方法与本发明提供的估计方法直接选择的步骤。首先统计步骤 B 中每根接收天线扫描到的极大值点的个数 N ，当各个接收天线的极大值点的个数 N 相等且大于预设的极大值点个数阈值时，执行步骤 C，而当各个接收天线的极大值点的个数 N 相等且不大于预设的极大值点个数阈值时，则采用原始的 Capon 估计方法进行 DOA 的估计。本发明中，上述预设的极大值点个数阈值为 2。

[56] 步骤 C，将步骤 B 所扫描到的信号分别与发射信号相乘，得到每根接收天线

的接收信号中各个峰值点对应的相位。

[57] 步骤 D，根据步骤 C 得到的相位以及发射信号构建虚拟接收信号，作为得到的虚拟扩展信号。

[58] 利用步骤 B 中恢复出来的

$$\gamma_{ij}$$

，构建第一个虚拟扩展信号为：

$$\begin{aligned}
 [59] \quad \hat{y}_1(t) &= \hat{\gamma}_{11} \cdot \hat{\gamma}_{11}^* \cdot \hat{\gamma}_{21}^* \cdot x_1(t) + \hat{\gamma}_{12} \cdot \hat{\gamma}_{12}^* \cdot \hat{\gamma}_{22}^* \cdot x_2(t) \\
 &= (\gamma_{11} + \tilde{\gamma}_{11}) \cdot (\gamma_{11} + \tilde{\gamma}_{11})^* \cdot (\gamma_{21} + \tilde{\gamma}_{21})^* \cdot x_1(t) \\
 &\quad + (\gamma_{12} + \tilde{\gamma}_{12}) \cdot (\gamma_{12} + \tilde{\gamma}_{12})^* \cdot (\gamma_{22} + \tilde{\gamma}_{22})^* \cdot x_2(t) \\
 &= (\gamma_{11}^2 \gamma_{21}^* + 2\tilde{\gamma}_{11} \gamma_{11} \gamma_{21}^* + 2\tilde{\gamma}_{11} \gamma_{11} \tilde{\gamma}_{21}^* + \tilde{\gamma}_{11}^2 \gamma_{21}^* + \tilde{\gamma}_{11}^2 \tilde{\gamma}_{21}^* + \gamma_{11}^2 \tilde{\gamma}_{21}^*) \cdot x_1(t) \\
 &\quad + (\gamma_{12}^2 \gamma_{22}^* + 2\tilde{\gamma}_{12} \gamma_{12} \gamma_{22}^* + 2\tilde{\gamma}_{12} \gamma_{12} \tilde{\gamma}_{22}^* + \tilde{\gamma}_{12}^2 \gamma_{22}^* + \tilde{\gamma}_{12}^2 \tilde{\gamma}_{22}^* + \gamma_{12}^2 \tilde{\gamma}_{22}^*) \cdot x_2(t)
 \end{aligned}$$

(15)

[60] 利用同样的方法可以得到第二个虚拟扩展信号为：

$$\begin{aligned}
 [61] \quad \hat{y}_2(t) &= \hat{\gamma}_{21} \cdot \hat{\gamma}_{21}^* \cdot \hat{\gamma}_{11}^* \cdot x_1(t) + \hat{\gamma}_{22} \cdot \hat{\gamma}_{22}^* \cdot \hat{\gamma}_{12}^* \cdot x_2(t) \\
 &= (\gamma_{21} + \tilde{\gamma}_{21}) \cdot (\gamma_{21} + \tilde{\gamma}_{21})^* \cdot (\gamma_{11} + \tilde{\gamma}_{11})^* \cdot x_1(t) \\
 &\quad + (\gamma_{22} + \tilde{\gamma}_{22}) \cdot (\gamma_{22} + \tilde{\gamma}_{22})^* \cdot (\gamma_{12} + \tilde{\gamma}_{12})^* \cdot x_2(t) \\
 &= (\gamma_{21}^2 \gamma_{11}^* + 2\gamma_{21} \tilde{\gamma}_{21} \gamma_{11}^* + \tilde{\gamma}_{21}^2 \gamma_{11}^* + \gamma_{21}^2 \tilde{\gamma}_{11}^* + 2\gamma_{21} \tilde{\gamma}_{21} \tilde{\gamma}_{11}^* + \tilde{\gamma}_{21}^2 \tilde{\gamma}_{11}^*) \cdot x_1(t) \\
 &\quad + (\gamma_{22}^2 \gamma_{12}^* + 2\gamma_{22} \tilde{\gamma}_{22} \gamma_{12}^* + \tilde{\gamma}_{22}^2 \gamma_{12}^* + \gamma_{22}^2 \tilde{\gamma}_{12}^* + 2\gamma_{22} \tilde{\gamma}_{22} \tilde{\gamma}_{12}^* + \tilde{\gamma}_{22}^2 \tilde{\gamma}_{12}^*) \cdot x_2(t)
 \end{aligned}$$

(16)

[62] 步骤 E，利用由虚拟扩展信号和原始的接收信号组成新的接收信号，计算新的接收信号的协方差和波束形成系数，利用得到的波束形成系数计算对应的估计谱，对得到的估计谱进行极值点的搜索，选取其中的极大值点作为估计结果，完成 DOA 的估计。

[63] 因此，新的接收信号 $\mathbf{r}_1$ 表示为：

$$[64] \quad \mathbf{r}_1 = \left[y_{1m}^T, y_{2m}^T, \dots, y_{N,m}^T, \hat{y}_1^T, \hat{y}_2^T, \dots, \hat{y}_{N,N}^T \right]^T$$

(17)

- [65] 其中, N_r 表示接收天线的根数, T 表示矩阵的转置, y_{1m} 、 y_{2m} , $y_{N_r m}$ 为在第 m 个脉冲时, 由目标源反射后到达第 1 根、第 2 根、第 N_r 根接收天线的接收信号,

$$\hat{y}_1^T, \hat{y}_2^T, \hat{y}_{N_r}^T$$

为构建的虚拟扩展信号。

- [66] 利用得到的新的接收信号, 计算其协方差矩阵为: $R=E\{r_1 r_1^H\}$, 则其波束形成系数为:

[67]

$$\mathbf{w}_1 = \frac{\mathbf{R}_1^{-1} \hat{\mathbf{v}}_r(\theta)}{\hat{\mathbf{v}}_r^H(\theta) \mathbf{R}_1^{-1} \hat{\mathbf{v}}_r(\theta)}$$

(18)

- [68] 由波束形成系数, 可以得到目标反射系数的估计谱为:

$$\hat{\beta}_k(\theta) = \frac{\mathbf{w}_1^H \mathbf{Z}_1 \mathbf{X}^* \mathbf{v}^*(\theta) \hat{\mathbf{v}}_r^H(\theta) \mathbf{w}_1}{\mathbf{w}_1^H \hat{\mathbf{v}}_r(\theta) \mathbf{v}^T(\theta) \mathbf{R}_X \mathbf{v}^*(\theta) \hat{\mathbf{v}}_r^H(\theta) \mathbf{w}_1}$$

(19)

- [69] 其中 $\mathbf{R}_X = \mathbf{X}^T \mathbf{X}^*$ 。然后按照原始的 Capon 估计方法完成 DOA 的估计, 不再赘述。

- [70] 图 3 至图 10 从各个方面对采用原始 capon 方法、实际增加天线 capon 方法、本发明提供的估计方法实现的 DOA 估计效果进行了对比, 可以看出本发明提供的估计方法在信噪比 SNR 比较低和采样点个数比较大时, 其估计性能比原始的 Capon 方法更好。

- [71] 图 11 示出了本发明提供的高分辨率 DOA 估计系统的结构原理, 其中各个模块可以通过软件、硬件或软硬件结合的方式实现。

- [72] 参照图 11, 本高分辨率 DOA 估计系统包括扫描模块 111、相位计算模块 112

、虚拟扩展信号构建模块 113、估计模块 114。其中，扫描模块 111 用于利用每个发射信号对每根接收天线的接收信号进行扫描，发射信号由目标源反射；然后相位计算模块 112 将扫描到的信号分别与发射信号相乘，得到每根接收天线的接收信号中各个峰值点对应的相位。虚拟扩展信号构建模块 113 根据相位计算模块 112 得到的相位以及发射信号构建虚拟扩展信号；最后，由估计模块 114 将虚拟扩展信号和接收信号组成新的接收信号，计算新的接收信号的协方差和 Capon 波束形成系数，进而完成 DOA 的估计。

[73] 其中，估计模块 114 通过如下公式得到新的接收信号：

$$\mathbf{r}_1 = \left[\mathbf{y}_{1m}^T, \mathbf{y}_{2m}^T, \dots, \mathbf{y}_{N_r m}^T, \hat{\mathbf{y}}_1^T, \hat{\mathbf{y}}_2^T, \dots, \hat{\mathbf{y}}_{N_r N_r}^T \right]^T$$

[74] 其中， N_r 表示接收天线的根数， T 表示矩阵的转置， $\mathbf{y}_{1m}$ 、 $\mathbf{y}_{2m}$ 、 $\mathbf{y}_{N_r m}$ 为在第 m 个脉冲时，由目标源反射后到达第 1 根、第 2 根、第 N_r 根接收天线的接收信号，

$$\hat{\mathbf{y}}_1^T, \hat{\mathbf{y}}_2^T, \dots, \hat{\mathbf{y}}_{N_r N_r}^T$$

为构建的虚拟扩展信号。

[75] 进一步地，该系统还包括一判断模块，用于统计扫描模块 111 对每根接收天线扫描到的大于预设的极大值点个数阈值的个数 N ，当各个接收天线的极大值点的个数 N 相等且大于预设的极大值点个数阈值时，触发相位计算模块 112 执行计算，而当各个接收天线的极大值点的个数 N 相等且不大于预设的极大值点个数阈值时，触发估计模块 114 采用原始的 Capon 估计方法进行 DOA 的估计。经试验验证，上述预设的极大值点个数阈值为 2 时效果较为理想。

[76] 上述各模块的运算原理如上文，此处不再一一赘述。

[77] 本发明在不增加现有接收天线和发射天线的情况下提高天线的自由度，尤其适用于当采样点个数比较少且 SNR 比较低或者采样点个数比较多的情况下的 MIMO 雷达中高分辨率的 DOA 估计。

[78] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已，并不用以限制本发明，凡在本发明的

精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权利要求书

- [权利要求 1] 一种 高分辨率 DOA 估计方法，其特征在于，所述方法包括下述步骤：
- 步骤 A，各接收天线接收由目标源反射的发射信号；
- 步骤 B，利用每个发射信号对每根接收天线的接收信号进行扫描；
- 步骤 C，将步骤 B 所扫描到的信号分别与发射信号相乘，得到每根接收天线的接收信号中各个峰值点对应的相位；
- 步骤 D，根据步骤 C 得到的相位以及发射信号构建虚拟扩展信号；
- 步骤 E，利用所述虚拟扩展信号和接收信号组成新的接收信号，计算所述新的接收信号的协方差和 Capon 波束形成系数，进而完成 DOA 的估计。
- [权利要求 2] 权利要求1所述的高分辨率DOA估计方法，其特征在于，在步骤B与步骤C之间，还包括下述步骤：
- 步骤B1，统计步骤B中每根接收天线扫描到的极大值点的个数N；
- 步骤B2，当各个接收天线的极大值点的个数N相等且大于预设的极大值点个数阈值时，执行步骤C。
- [权利要求 3] 如权利要求1所述的高分辨率DOA估计方法，其特征在于，步骤E中新的接收信号 r_1 通过如下公式得到：

$$\mathbf{r}_1 = \left[y_{1m}^T, y_{2m}^T, \dots, y_{N_r m}^T, \hat{y}_1^T, \hat{y}_2^T, \dots, \hat{y}_{N_r N_r}^T \right]^T$$

其中， N_r 表示接收天线的根数，T表示矩阵的转置， y_{1m} 、 y_{2m} 、 $y_{N_r m}$ 为在第m个脉冲时，由目标源反射后到达第1根、第2根、第 N_r 根接收天线的接收信号，

$$\hat{y}_1^T, \hat{y}_2^T, \hat{y}_{N_r N_r}^T$$

为构建的虚拟扩展信号。

[权利要求 4] 如权利要求2所述的高分辨率DOA估计方法，其特征在于，在步骤B与步骤C之间，还包括下述步骤：

步骤B3，当各个接收天线的极大值点的个数N相等且不大于预设的极大值点个数阈值时，则采用原始的Capon估计方法进行DOA的估计。

[权利要求 5] 如权利要求2或4所述的高分辨率DOA估计方法，其特征在于，所述预设的极大值点个数阈值为2。

[权利要求 6] 一种高分辨率DOA估计系统，其特征在于，包括：
扫描模块，用于利用每个发射信号对每根接收天线的接收信号进行扫描；所述发射信号由目标源反射；
相位计算模块，用于将扫描到的信号分别与发射信号相乘，得到每根接收天线的接收信号中各个峰值点对应的相位；
虚拟扩展信号构建模块，用于根据所述相位计算模块得到的相位以及发射信号构建虚拟扩展信号；
估计模块，用于将所述虚拟扩展信号和接收信号组成新的接收信号，计算所述新的接收信号的协方差和Capon波束形成系数，进而完成DOA的估计。

[权利要求 7] 如权利要求6所述的系统，其特征在于，所述系统还包括：
判断模块，用于统计所述扫描模块对每根接收天线扫描到的极大值点的个数N，当各个接收天线的极大值点的个数N相等且大于预设的极大值点个数阈值时，触发所述相位计算模块执行计算。

[权利要求 8] 如权利要求6所述的系统，其特征在于，所述估计模块通过如下公式得到新的接收信号：

$$\mathbf{r}_1 = \left[y_{1m}^T, y_{2m}^T, \dots, y_{N_r m}^T, \hat{y}_1^T, \hat{y}_2^T, \dots, \hat{y}_{N_r N_r}^T \right]^T$$

其中， N_r 表示接收天线的根数， T 表示矩阵的转置， y_{1m} 、 y_{2m} 、 $y_{N_r m}$ 为在第 m 个脉冲时，由目标源反射后到达第1根、第2根、第 N_r

根据接收天线的接收信号，

$$\hat{y}_1^T, \hat{y}_2^T, \hat{y}_{N_r N_r}^T$$

为构建的虚拟扩展信号。

[权利要求 9]

如权利要求7所述的系统，其特征在于，所述估计模块还用于在各个接收天线的极大值点的个数N相等且不大于预设的极大值点个数阈值时，采用原始的Capon估计方法进行DOA的估计。

[权利要求 10]

如权利要求7或9所述的系统，其特征在于，所述预设的极大值点个数阈值为2。

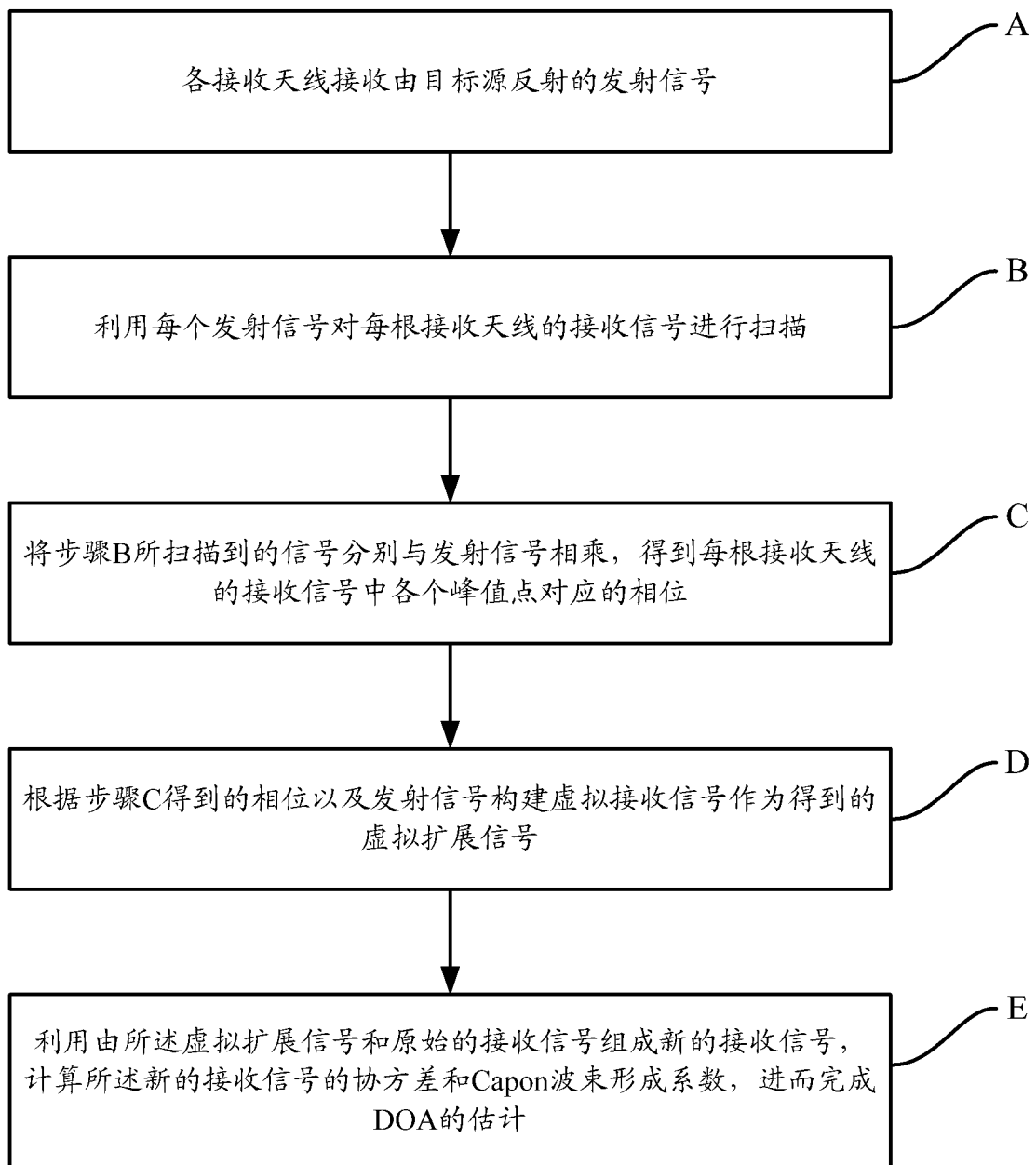


图 1

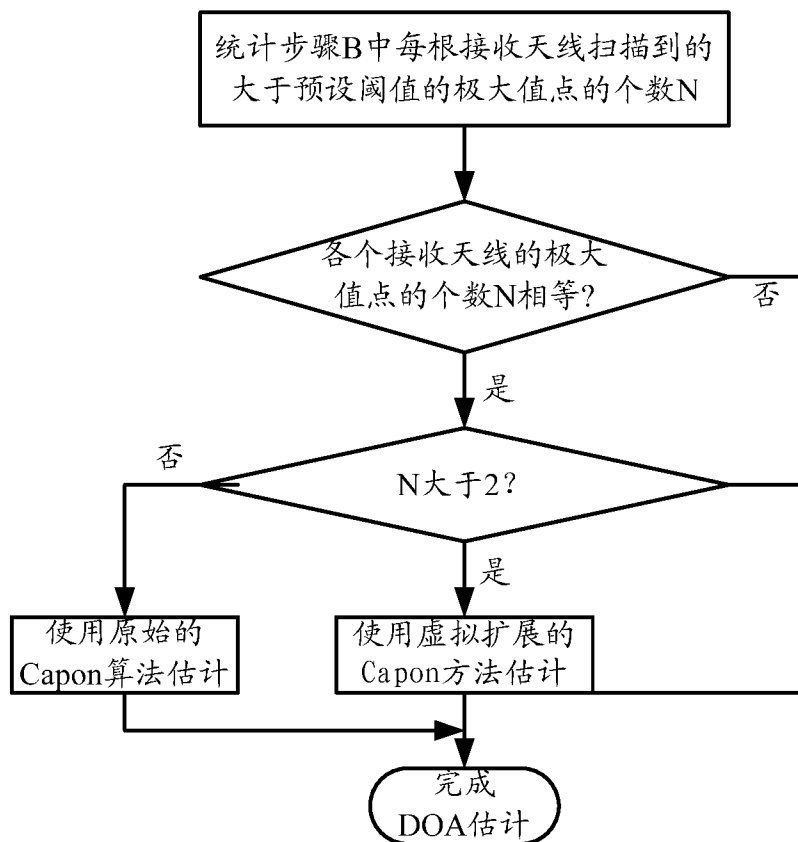


图 2

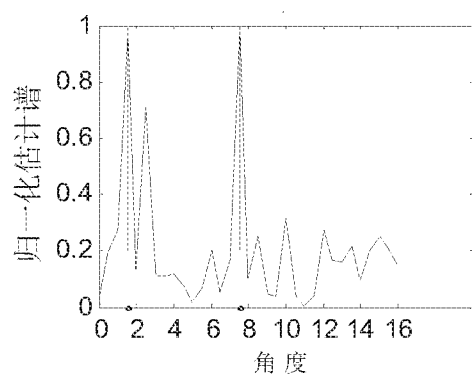


图 3A

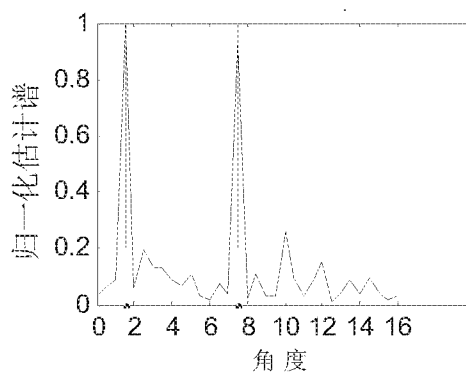


图 3B

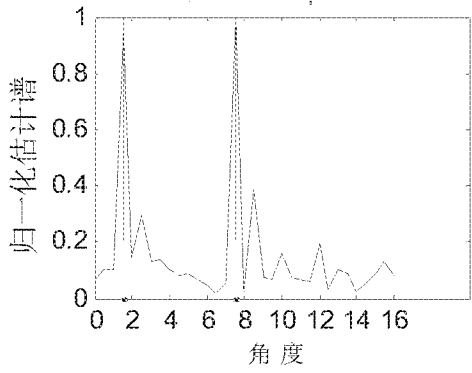


图 3C

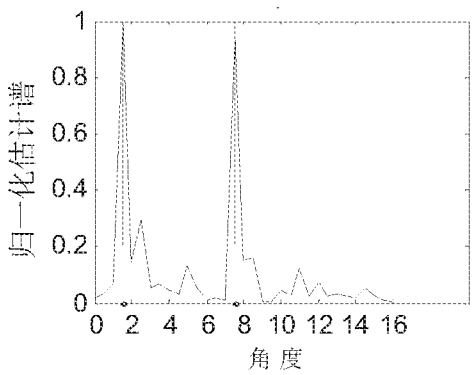


图 4A

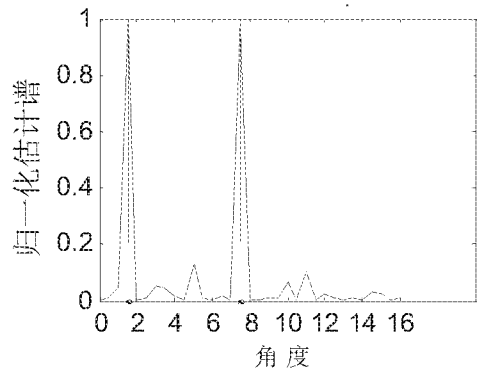


图 4B

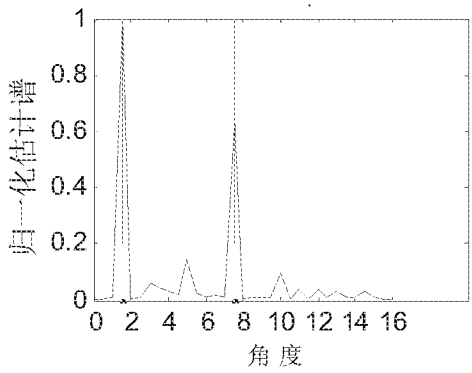


图 4C

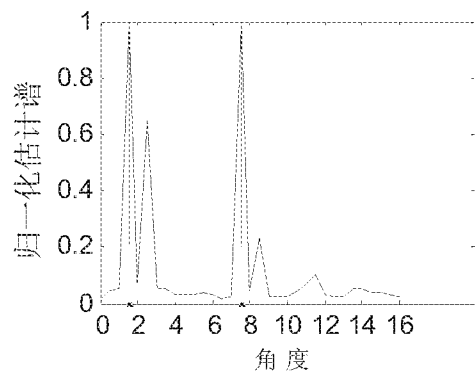


图 5A

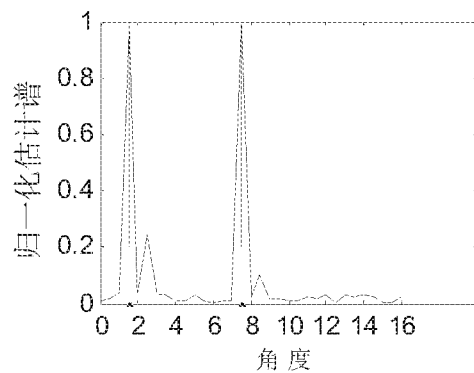


图 5B

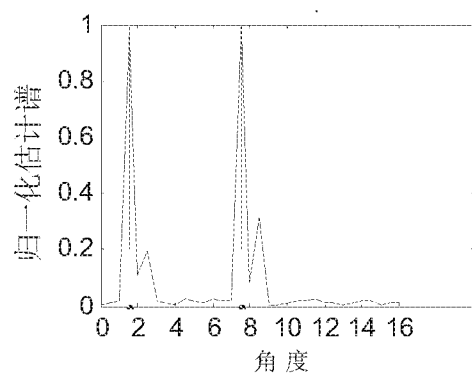


图 5C

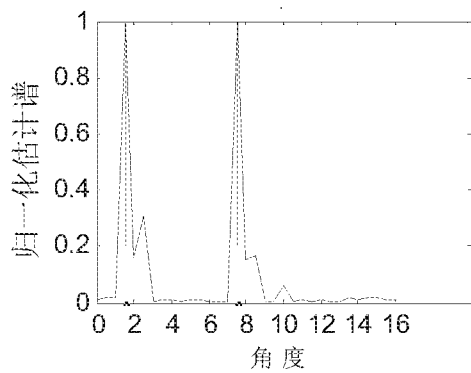


图 6A

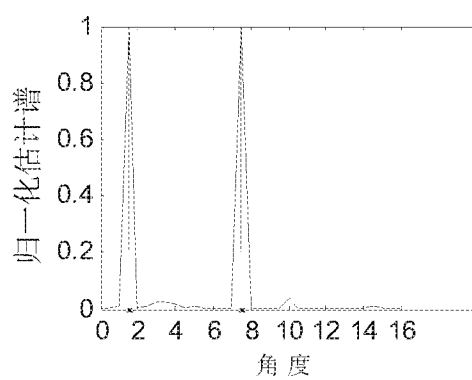


图 6B

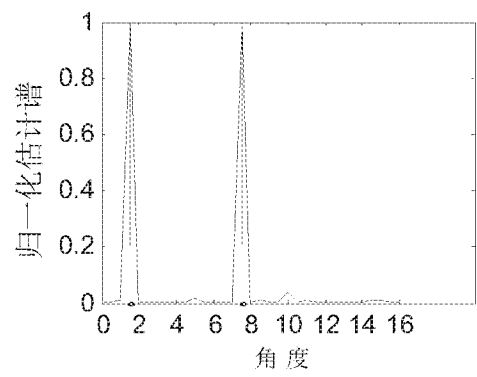


图 6C

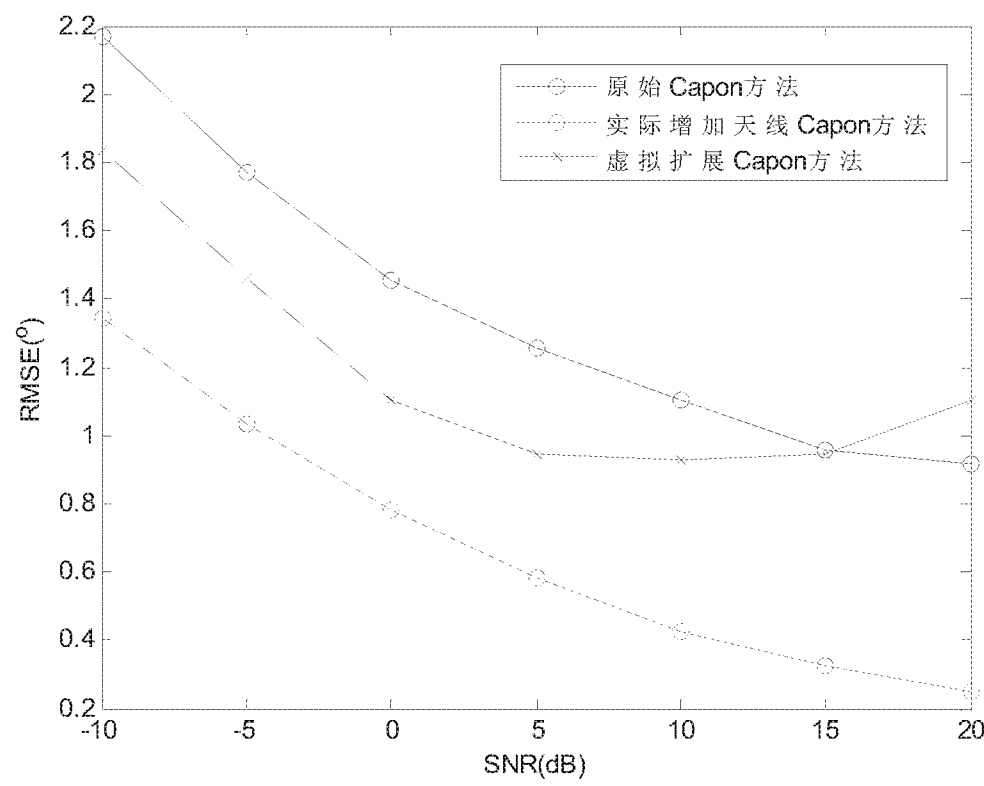


图 7A

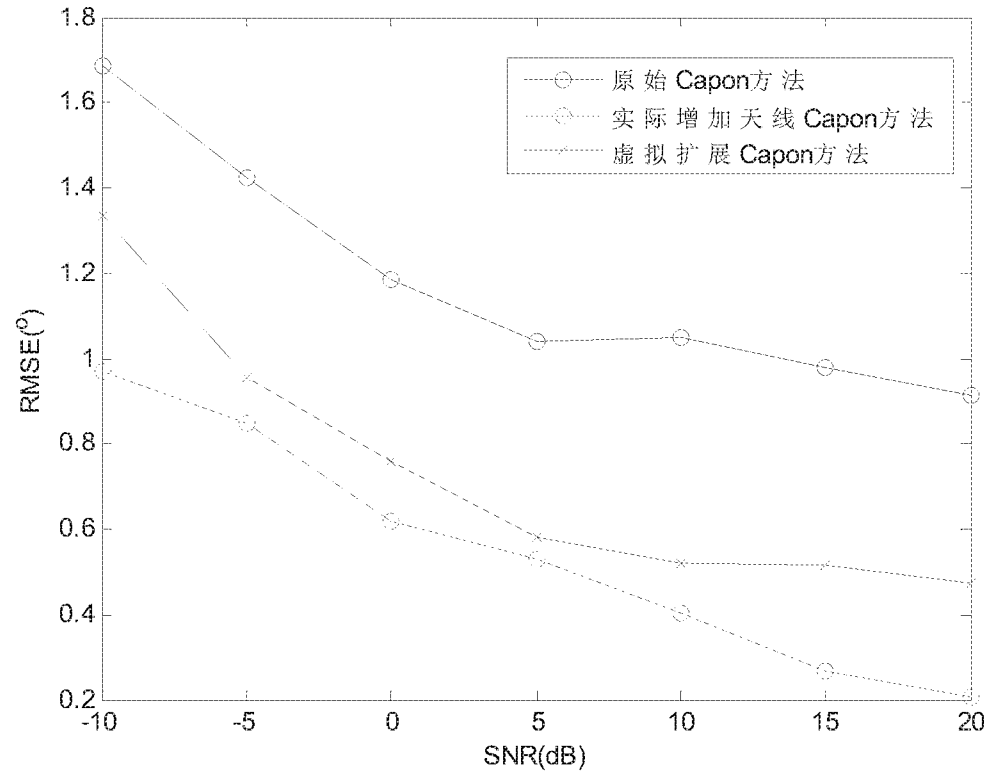


图 7B

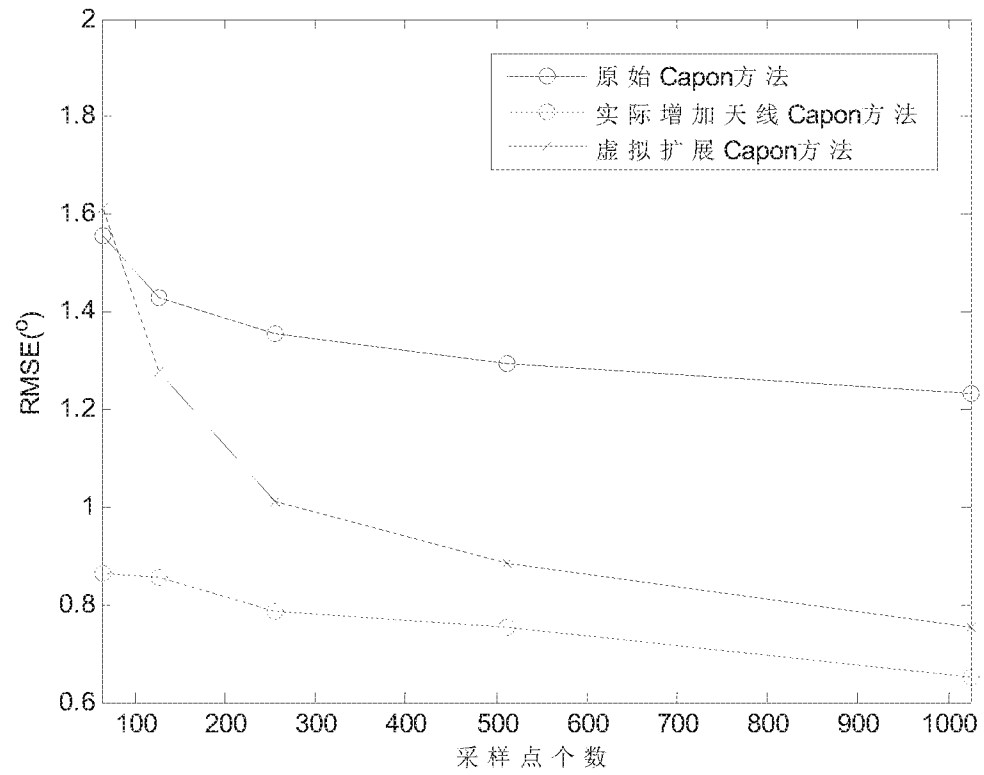


图 8A

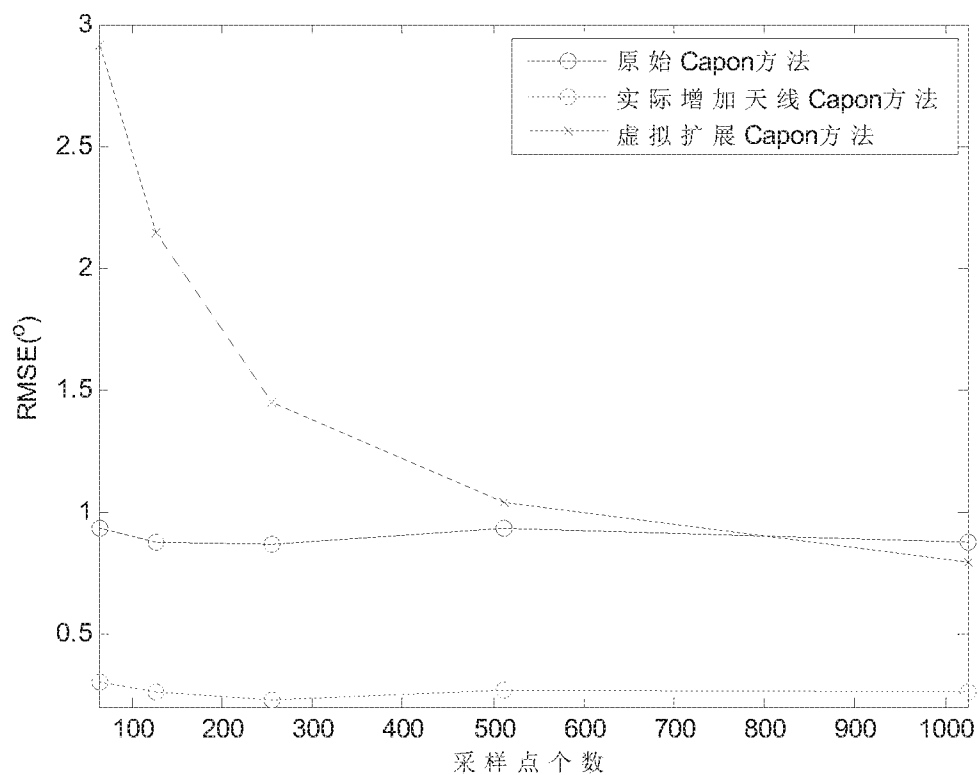


图 8B

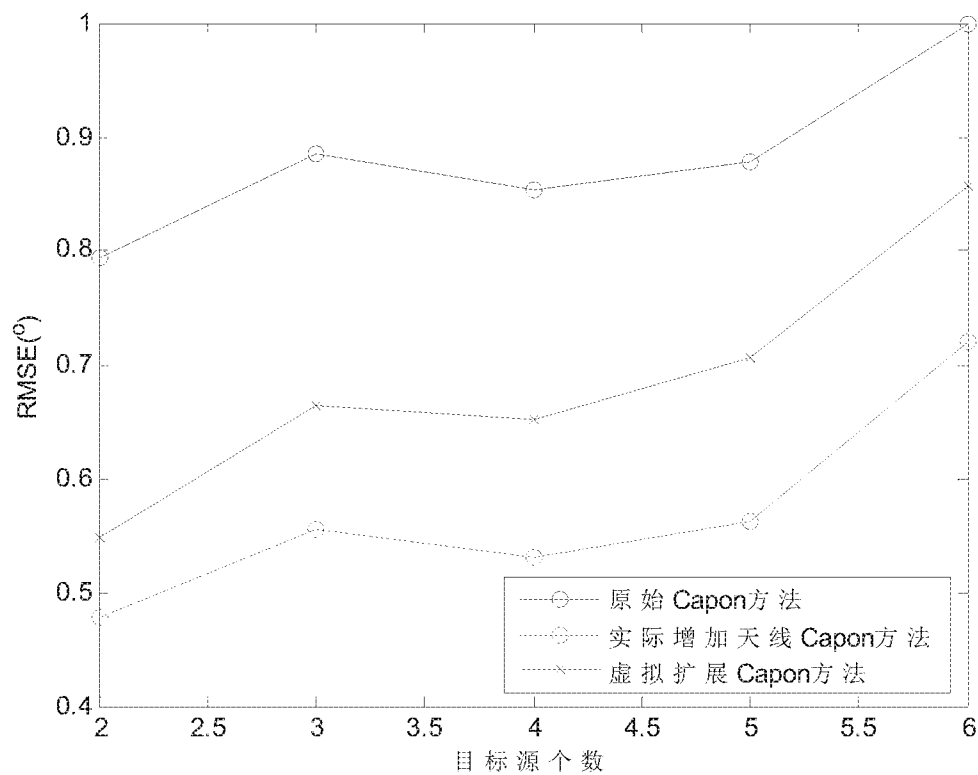


图 9A

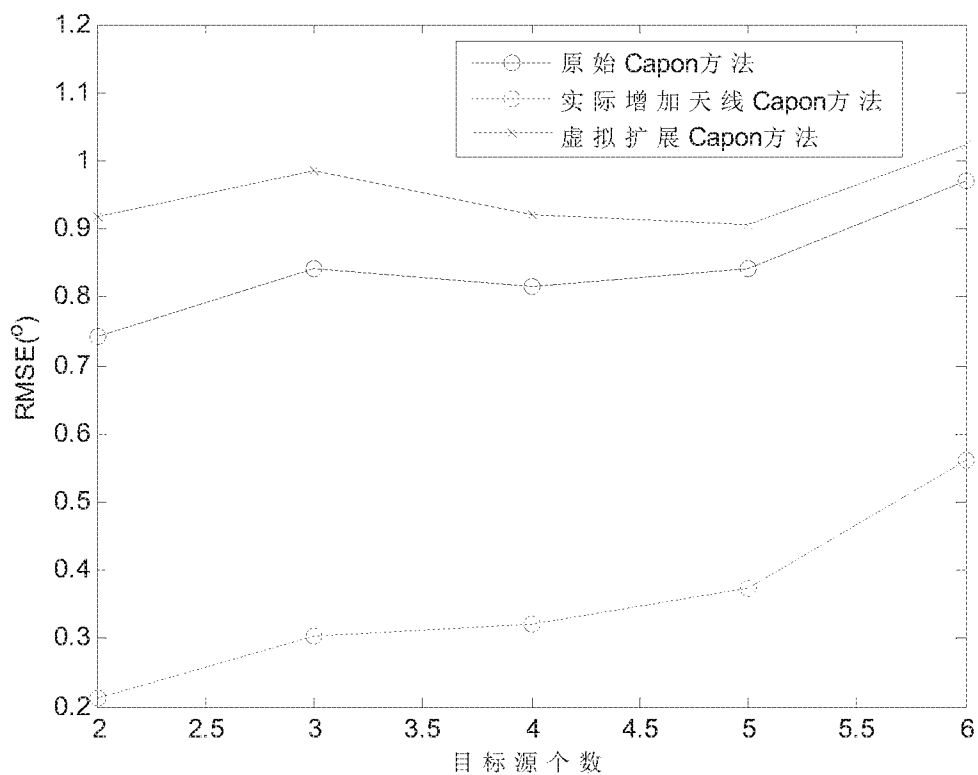


图 9B

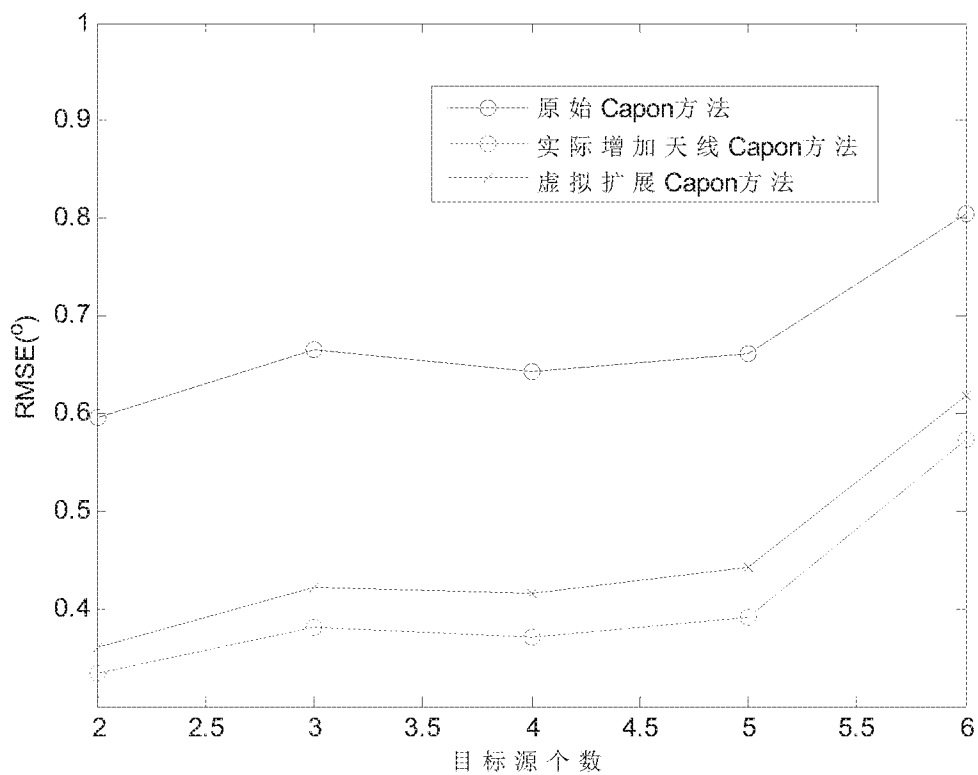


图 10A

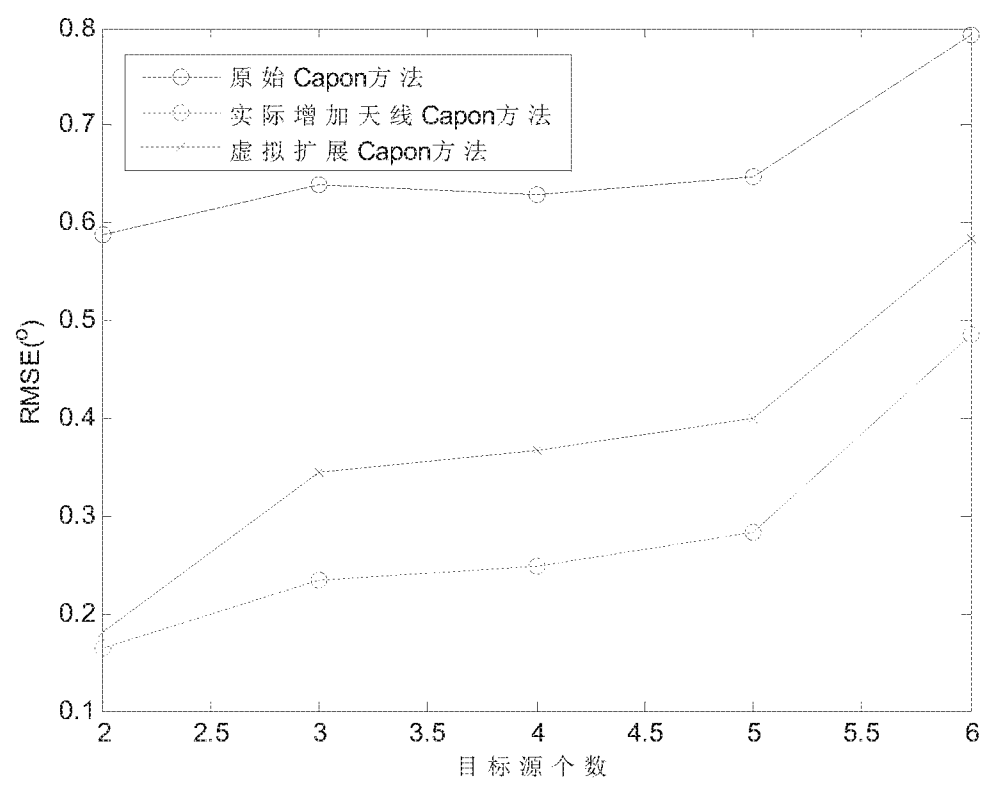


图 10B

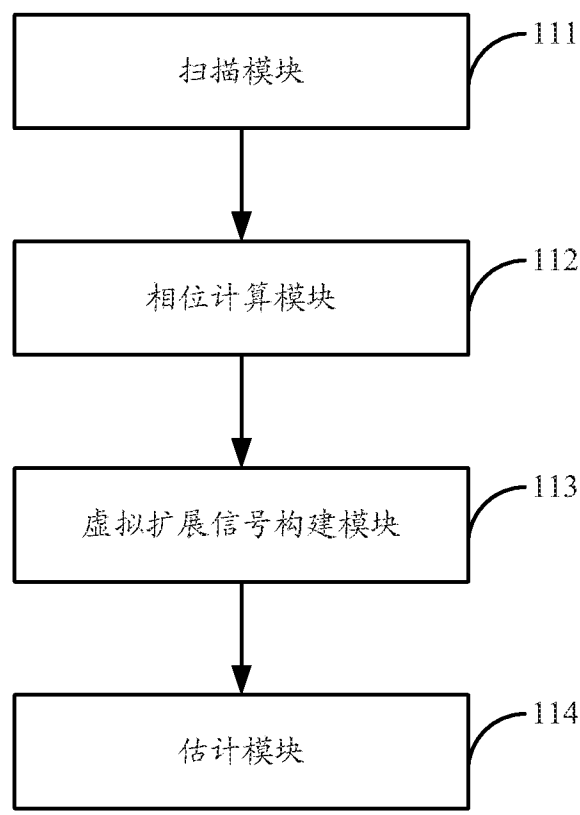


图 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2014/088099

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01S 3/14 (2006.01) i; G01S 7/02 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

USTXT; EPTXT; CNTXT; WOTXT: covariance, antenna s (root number or number), peak, DOA, capon, product or multiplication or multiply or multiplies or multiplying, phase

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 103760519 A (SHENZHEN UNIVERSITY), 30 April 2014 (30.04.2014), the whole document	1-10
A	CN 1384368 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP.), 11 December 2002 (11.12.2002), description, page 12, lines 5-21, and figure 2	1-10
A	CN 102803984 A (GROUPE DES ÉCOLES DES TÉLÉCOMMUNICATIONS), 28 November 2012 (28.11.2012), the whole document	1-10
A	CN 101729092 A (PANASONIC CORPORATION), 09 June 2010 (09.06.2010), the whole document	1-10
A	US 2008122681 A1 (FUJITSU LTD. et al.), 29 May 2008 (29.05.2008), the whole document	1-10
A	US 2009243933 A1 (FUJITSU LTD.), 01 October 2009 (01.10.2009), the whole document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 29 December 2014 (29.12.2014)	Date of mailing of the international search report 15 January 2015 (15.01.2015)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer SUN, Yi Telephone No.: (86-10) 62085713

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2014/088099

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 103760519 A	30 April 2014	None	
CN 1384368 A	11 December 2002	EP 1253434 A1	30 October 2002
		US 2003012262 A1	16 January 2003
		US 6717979 B2	06 April 2004
		JP 2003004834 A	08 January 2003
		CN 1254692 C	03 May 2006
		EP 1253434 B1	07 April 2010
		DE 60141741 D1	20 May 2010
CN 102803984 A	28 November 2012	JP 2012524898 A	18 October 2012
		EP 2422210 B	11 September 2013
		WO 2010122370 A1	28 October 2010
		KR 20120016237 A	23 February 2012
		US 2012162012 A1	28 June 2012
		EP 2422210 A1	29 February 2012
		ES 2439965 T3	27 January 2014
CN 101729092 A	09 June 2010	US 8532064 B2	10 September 2013
		US 2007273584 A1	29 November 2007
		US 2003210670 A1	13 November 2003
		JP 3895228 B2	22 March 2007
		DE 60321266 D1	10 July 2008
		EP 1361679 A2	12 November 2003
		US 7263083 B2	28 August 2007
		CN 1457164 A	19 November 2003
		US 2011090120 A1	21 April 2011
		CN 100583710 C	20 January 2010
		JP 2004032656 A	29 January 2004
		US 8520641 B2	27 August 2013
		EP 1361679 B1	28 May 2008
		US 7860064 B2	28 December 2010
		US 2011090813 A1	21 April 2011
		JP 4430060 B2	10 March 2010
		JP 2007049754 A	22 February 2007
US 2008122681 A1	29 May 2008	US 7847733 B2	07 December 2010
		WO 2006067857 A1	29 June 2006
US 2009243933 A1	01 October 2009	US 7912680 B2	22 March 2011
		EP 2105758 B1	22 May 2013
		JP 2009243947 A	22 October 2009
		JP 5320792 B2	23 October 2013
		EP 2105758 A3	27 October 2010
		EP 2105758 A2	30 September 2009

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2014/088099

A. 主题的分类

G01S 3/14(2006.01)i; G01S 7/02(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01S

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

USTXT;EPTXT;CNTXT;WOTXT:相乘 or 乘以 or 乘积, 协方差, 天线 s (根数 or 数量), 峰值, 相位, DOA, capon, product or multiplication or multiply or multiplies or multiplying, phase

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 103760519 A (深圳大学) 2014年 4月 30日 (2014 - 04 - 30) 全文	1-10
A	CN 1384368 A (三菱电机株式会社) 2002年 12月 11日 (2002 - 12 - 11) 说明书第12页第5-21, 附图2	1-10
A	CN 102803984 A (法国电信教育集团) 2012年 11月 28日 (2012 - 11 - 28) 全文	1-10
A	CN 101729092 A (松下电器产业株式会社) 2010年 6月 09日 (2010 - 06 - 09) 全文	1-10
A	US 2008122681 A1 (FUJITSU LTD 等) 2008年 5月 29日 (2008 - 05 - 29) 全文	1-10
A	US 2009243933 A1 (FUJITSU LTD) 2009年 10月 01日 (2009 - 10 - 01) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2014年 12月 29日

国际检索报告邮寄日期

2015年 1月 15日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
北京市海淀区蓟门桥西土城路6号
100088 中国

传真号 (86-10)62019451

受权官员

孙毅

电话号码 (86-10)62085713

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2014/088099

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	103760519	A	2014年 4月 30日	无			
CN	1384368	A	2002年 12月 11日	EP	1253434	A1	2002年 10月 30日
				US	2003012262	A1	2003年 1月 16日
				US	6717979	B2	2004年 4月 06日
				JP	2003004834	A	2003年 1月 08日
				CN	1254692	C	2006年 5月 03日
				EP	1253434	B1	2010年 4月 07日
				DE	60141741	D1	2010年 5月 20日
CN	102803984	A	2012年 11月 28日	JP	2012524898	A	2012年 10月 18日
				EP	2422210	B1	2013年 9月 11日
				WO	2010122370	A1	2010年 10月 28日
				KR	20120016237	A	2012年 2月 23日
				US	2012162012	A1	2012年 6月 28日
				EP	2422210	A1	2012年 2月 29日
				ES	2439965	T3	2014年 1月 27日
CN	101729092	A	2010年 6月 09日	US	8532064	B2	2013年 9月 10日
				US	2007273584	A1	2007年 11月 29日
				US	2003210670	A1	2003年 11月 13日
				JP	3895228	B2	2007年 3月 22日
				DE	60321266	D1	2008年 7月 10日
				EP	1361679	A2	2003年 11月 12日
				US	7263083	B2	2007年 8月 28日
				CN	1457164	A	2003年 11月 19日
				US	2011090120	A1	2011年 4月 21日
				CN	100583710	C	2010年 1月 20日
				JP	2004032656	A	2004年 1月 29日
				US	8520641	B2	2013年 8月 27日
				EP	1361679	B1	2008年 5月 28日
				US	7860064	B2	2010年 12月 28日
				US	2011090813	A1	2011年 4月 21日
				JP	4430060	B2	2010年 3月 10日
				JP	2007049754	A	2007年 2月 22日
US	2008122681	A1	2008年 5月 29日	US	7847733	B2	2010年 12月 07日
				WO	2006067857	A1	2006年 6月 29日
US	2009243933	A1	2009年 10月 01日	US	7912680	B2	2011年 3月 22日
				EP	2105758	B1	2013年 5月 22日
				JP	2009243947	A	2009年 10月 22日
				JP	5320792	B2	2013年 10月 23日
				EP	2105758	A3	2010年 10月 27日
				EP	2105758	A2	2009年 9月 30日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)