

文章编号: 2095-4980(2025)08-0863-07

基于时频相位差估计的多天线联合信号接收合成算法

胡春朝, 谭志强, 褚家旭, 云 超

(63891 部队, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 针对多天线联合接收算法在低信噪比条件下存在计算复杂度较高, 并且合成增益低的问题, 提出一种基于时频相位差补偿的多天线联合信号接收合成算法。该算法在互模糊函数(CAF)和相位差估计的压力耦合方程组的半隐式算法(SIMPLE)基础上, 采用纠偏后再加权的合成方法, 有效降低信号处理设备计算复杂度。仿真和实验结果表明, 对存在时频相位差的双通道信号进行仿真分析, 可实现补偿后的信号完全对齐, 验证了算法的可行性; 在信噪比为 7 dB 和 9 dB 的实验条件下, 测试信号接收增益提升约 2.76 dB, 联合信号接收增益达到理论值的 92%, 满足合成后的天线高增益, 大幅度提高对微弱信号的接收能力, 为深空极弱信号的接收提供一种新的解决方案。

关键词: 信噪比; 互模糊函数; 压力耦合方程组的半隐式算法(SIMPLE); 时频相位差; 增益

中图分类号: TN927

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024053

Antenna joint signal reception synthesis algorithm based on time-frequency phase difference estimation

HU Chunchao, TAN Zhiqiang, CHU Jiaxu, YUN Chao

(No.63891 Troops of PLA, Luoyang Henan 471000, China)

Abstract: To address the high computational complexity and low combining gain of conventional multi-antenna joint reception algorithms under low-SNR(Signal-to-Noise Ratio) conditions, a time-frequency phase-difference compensation-based multi-antenna joint signal-reception and combining algorithm is proposed. Building on the Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations(SIMPLE) framework applied to the Cross-Ambiguity Function(CAF) and phase-difference estimation, the algorithm first performs phase-error correction and then applies weighted combining, effectively lowering the computational burden on the signal-processing hardware. Simulation and experimental results demonstrate that, for two-channel signals exhibiting time-frequency phase differences, the proposed algorithm achieves perfect post-compensation alignment, confirming its feasibility. Under practical SNRs of 7 dB and 9 dB, the measured receive gain improves by approximately 2.76 dB, and the joint reception gain reaches 92% of the theoretical maximum, delivering the high post-combining gain required and significantly enhancing the reception of extremely weak signals. The approach offers a novel solution for acquiring ultra-faint deep-space signals.

Keywords: Singal-to-Noise-Ratio; Cross-Ambiguity Function; Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations(SIMPLE); time-frequency phase difference; gain

随着深空信号探测技术的快速发展, 需要进行接收的信号信噪比越来越低。为提高信号接收质量, 一般采

收稿日期: 2024-01-21; 修回日期: 2024-03-26

引用格式: 胡春朝, 谭志强, 褚家旭, 等. 基于时频相位差估计的多天线联合信号接收合成算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(8): 863-869. DOI:10.11805/TKYDA2024053.

Citation format: HU Chunchao, TAN Zhiqiang, CHU Jiaxu, et al. Antenna joint signal reception synthesis algorithm based on time-frequency phase difference estimation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(8): 863-869. DOI:10.11805/TKYDA2024053.

用增大天线口径实现,而架设大型天线成本高,建设周期长,稳定性差,难以灵活快速地完成信号的接收。另一方面,增大天线口径提高信号质量的方法已接近极限,难以适应当下对深空微弱信号的接收需求。因此,为克服大口径天线存在的缺点,提高对低信噪比信号的接收质量,利用天线组阵^[1-2]技术对来自多个天线的同一信号进行合成,以等效增加天线口径,成为提高信噪比的最有效方法之一,给极低信噪比信号的接收提供了途径。

国外自 20 世纪 60 年代开始对多天线信号合成技术进行研究,深空微弱信号探测组阵最早由 1965 年美国喷气推进实验室提出^[3],立足于深空网(Deep Space Network, DNS)的应用环境,采用全频谱组阵天线,开启了深空下行天线组阵接收的新篇章。国内,2005 年北京跟踪与通信技术研究所最早开始深空测控技术、微弱信号天线组阵技术研究,并建立了我国首个 4 m×12 m 的天线组阵系统。

理论研究方面,深空天线组阵常用的信号合成算法有 SIMPLE^[4]、多个相位锁定元素信号(Signal Using Multiple Phased Locked Elements, SUMPLE)^[5]、Eigen^[6]、最小二乘估计(Least Squares Estimation, LSFIT)^[7]等,仅从合成性能上看, SIMPLE 算法适合少量天线组阵,在多天线微弱信号情况下组阵效果不佳。SUMPLE 在微弱信号条件下存在相位漂移现象,在实际应用中需进行相位补偿,但其处理量与天线的平方成正比,因此,在多天线联合接收中应用广泛。Eigen 算法则随着天线数目增多,其运算量明显增大,信号实时处理能力较差。相比之下, Eigen 算法具有最小的合成损失,但需计算信号之间的互相关函数,运算量较大。

文献[8]给出了 SIMPLE 合成算法的 2 种分级实现方法,降低了需同时传输的信号路数,但增加了信号至天线组的反馈,不利于批量数据处理模式的实现;文献[9]提出了合成信号存在性检测方法,提高了低信噪比条件下信号检测能力,但其算法计算复杂度较高,对硬件设备提出了较高的计算要求。为进一步提高检测性能,降低算法复杂度,本文提出一种基于时频相位差补偿的信号合成算法,将所有天线时频域对齐后计算最优合成权值,而不是简单地与某一路信号对齐,提高了信号相关性联合检测性能,从而更加适用于微弱信号的接收。仿真与实验数据表明,该算法能够准确完成时频相位差估计补偿,在低信噪比条件下信号增益提升明显。

1 实现途径及基本原理

1.1 实现途径

基于时频相位差补偿的多天线联合接收算法实现途径主要为:

1) 根据系统天线的分布,给出多天线联合接收的一般信号模型,分析多天线接收信号之间的特殊差异,在此基础上,确定随机分布的多天线组阵方式。

2) 多天线接收到的各路信号之间存在时频差,采用基于互模糊函数^[10]的时频差联合估计算法,对接收到的其中一路信号进行时频差移位后与参考路信号进行互相关运算,互模糊函数的峰值对应的时频移参数为时频差的估计值。相较于时频差单独估计算法,基于互模糊函数的联合估计算法可有效减小小时频差互耦合效应引起的估计误差。

3) 消除时频差之后,对各路信号的相位差进行估计补偿,之后根据最大信噪比准则估计各路信号合成权值,实现合成信号信噪比最大化。采用相位差估计的 SIMPLE 算法^[11],算法中的参考信号为除被估计天线信号外的其他所有天线加权和组成的信号。作为流转的参考信号,各路信号分别与其他对应的参考信号做互相关运算,每次迭代后,前一个权值被新的权值替代,重复进行运算,最终各路信号的加权和和信号为合成信号。多天线联合接收算法流程如图 1 所示。

1.2 基本原理

如图 2 所示,多路信号 T_1 、 T_2 、 $\dots$ 、 T_n 经天线接收并下变频至中频后,针对特定的接收机带宽内信号,在相同的时钟同步条件下同时进行带通采样,并分别进入信号检测模块。完成信号检测后,将信号个数、起止频率、中心频率、带宽等检测结果送入信号监视、分选、合成权值估计模块,同时在检测后的 N 路信号中任选一路作为参考信号,

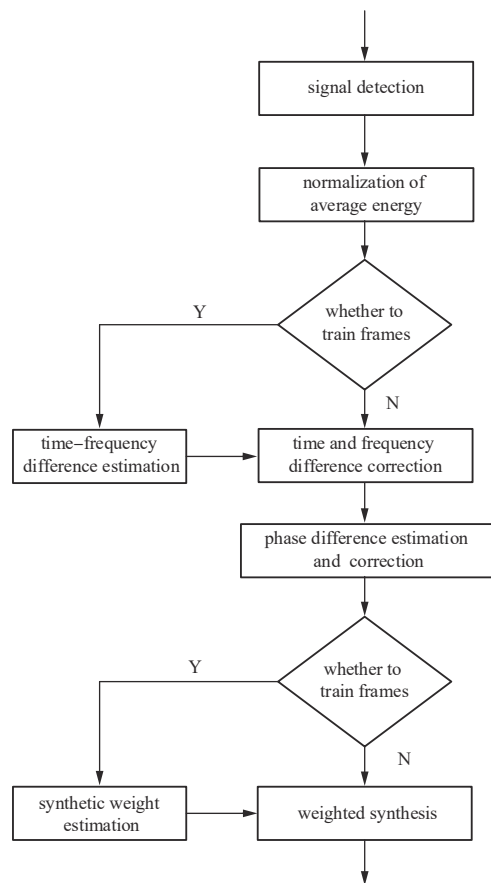


Fig.1 Flow of multi-antenna joint receiving algorithm
图 1 多天线联合接收算法流程

其余路信号分别与其进行时频差与相位差估计及补偿, 使 N 路信号在时频域上对齐, 最后根据最优权值进行相干权值合成。

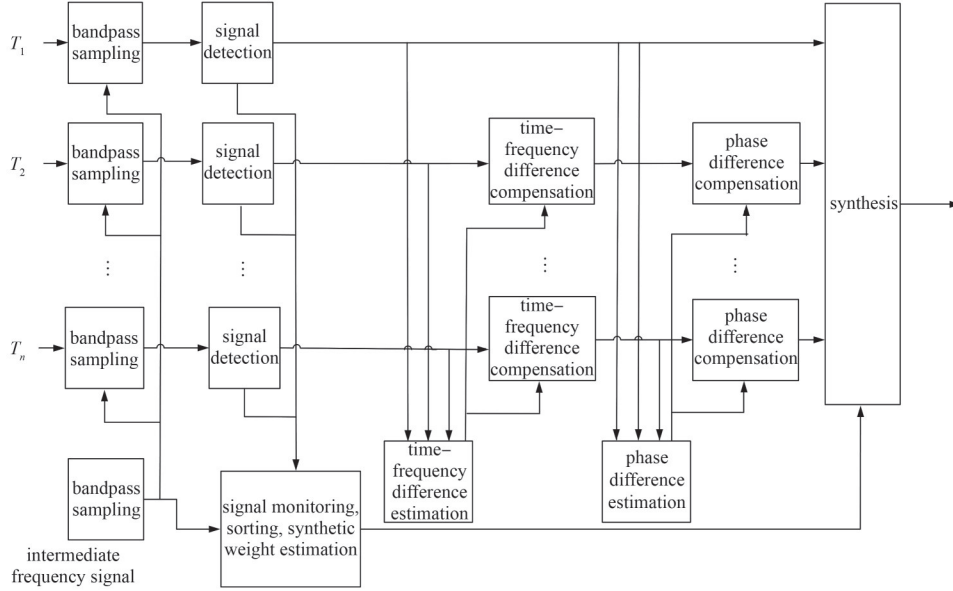


Fig.2 Multi-antenna joint receiving processing model

图2 多天线联合接收处理模型

2 参数估计与算法合成

2.1 时频差估计

考虑到时频差之间的互耦效应, 采用互模糊函数(CAF)的时频差联合估计算法。以其中两路信号为例, 接收信号模型为:

$$\begin{cases} x_1(k) = a_1 s(k) \exp\{j[2\pi f_1 k T_s + \theta_1]\} + n_1(k) \\ x_2(k) = a_2 s(k - \tau) \exp\{j[2\pi f_2 k T_s + \theta_2]\} + n_2(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_1 、 a_2 为信号幅度; $s(k)$ 为发送信号; τ 为第2路信号相对于第1路信号的时延差; f_1 、 f_2 为两路信号载频, 定义频差 $\Delta f = f_2 - f_1$; T_s 为采样周期; θ_1 、 θ_2 为初始相位, 定义相位差 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$; $n_1(k)$ 、 $n_2(k)$ 为高斯白噪声, 高斯白噪声与信号以及其他路噪声不相关。信号 $x_1(k)$ 和 $x_2(k)$ 之间的二阶 CAF 定义为:

$$\text{CAF}(f, \tau) = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{TT_s} [x_1(k) * x_2(k + \tau) \exp(j2\pi f k T_s)] \quad (2)$$

互模糊函数可以描述为对一路信号进行时频移位后与参考路信号进行互相关运算, 互模糊函数的峰值对应的时频移参数为时频差的估计值。在进行时频差估计时, 利用其余路天线接收信号与参考路信号进行互模糊函数计算, 将求解的时频差估计值作为补偿值。

2.2 相位差估计

经过时频差补偿后, 可认为两路信号之间仅存在相位差, 信号模型为:

$$\begin{cases} x_1(k) = a_1 s(k) \exp\{j[2\pi f_1 k T_s + \theta_1]\} + n_1(k) \\ x_2(k) = a_2 s(k) \exp\{j[2\pi f_1 k T_s + \theta_2]\} + n_2(k) \end{cases} \quad (3)$$

在不考虑噪声的条件下, 通过相关运算, 可得

$$\frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x_1(k) * x_2(k) = a_1 a_2 s^2(k) \exp\{j(\theta_1 - \theta_2)\} \quad (4)$$

因此相位差估计值为:

$$\Delta\theta = \angle \left(\frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x_1(k) * x_2(k) \right) \quad (5)$$

利用其余路天线接收信号与参考路信号进行相位差估计, 并进行相位差补偿。相较于基于迭代的 SUMPLE 算法, 相位差估计的 SIMPLE 算法利用少量样本信号即可进行相位差估计^[12], 可满足实时性要求。

2.3 算法合成

设时、频域完全对齐的两路信号为:

$$\begin{cases} x_1(k) = a_1 s_m(k) + n_1(k) \\ x_2(k) = a_2 s_m(k) + n_2(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $s_m(k) = s(k) \exp \{j[2\pi f_1 k T_s + \theta_1]\}$ 。

设 $s_m(k)$ 功率为 P , 噪声 $n_1(k)$ 、 $n_2(k)$ 功率分别为 N_1 、 N_2 , 最优合成权值分别为 w_1 、 w_2 , 且 $z = w_1/w_2$ 。则合成信号为:

$$x_c(k) = (w_1 a_1 + w_2 a_2) s_m(k) + w_1 n_1(k) + w_2 n_2(k) \quad (7)$$

其信噪比为:

$$R_{\text{SN,c}} = \frac{(w_1 a_1 + w_2 a_2)^2 P}{w_1^2 N_1 + w_2^2 N_2} = \frac{(z a_1 + a_2)^2 P}{z^2 N_1 + N_2} \quad (8)$$

取信噪比最大值, 即:

$$\frac{\partial R_{\text{SN,c}}}{\partial z} = \frac{2a_1 P (z a_1 + a_2) (z^2 N_1 + N_2) - 2z N_1 P (z a_1 + a_2)^2}{(z^2 N_1 + N_2)^2} = 0 \quad (9)$$

此时, 最优合成信噪比为:

$$R_{\text{SN,max}} = \frac{(a_1^2 N_2 + a_2^2 N_1) P}{N_1 N_2} = \frac{a_1^2 P}{N_1} + \frac{a_2^2 P}{N_2} = R_{\text{SN,1}} + R_{\text{SN,2}} = \frac{R_{\text{SN,1}} + R_{\text{SN,2}}}{2} \times 2 \quad (10)$$

在时频域上对齐的两路信号最优合成权值为:

$$z = \frac{w_1}{w_2} = \frac{a_1 N_2}{a_2 N_1} = \frac{a_2 R_{\text{SN,1}}}{a_1 R_{\text{SN,2}}} \quad (11)$$

设两路信号的信噪比比值形式均值 $R_{\text{SN,avg}} = (R_{\text{SN,1}} + R_{\text{SN,2}})/2$, 则最优合成信噪比对数形式为:

$$R_{\text{SN,max}} = R_{\text{SN,avg}} + 10 \lg 2 \approx R_{\text{SN,avg}} + 3 \quad (12)$$

将以上推导过程扩展到 M 路接收信号, 则可得

$$R_{\text{SN,max}} = R_{\text{SN,1}} + R_{\text{SN,2}} + \cdots + R_{\text{SN,M}} = \frac{R_{\text{SN,1}} + R_{\text{SN,2}} + \cdots + R_{\text{SN,M}}}{M} \times M \approx R_{\text{SN,avg}} \times M \quad (13)$$

对数形式为:

$$R_{\text{SN,max}} \approx R_{\text{SN,avg}} + 10 \lg M \quad (14)$$

式中 $10 \lg M$ 为理论合成增益, 即分集增益。在 M 路信号接收信噪比不相等的情况下, 其合成增益的理论上限等于各路信噪比求均值后再取对数。

利用噪声零均值特征, 将各路中频信号进行功率归一化:

$$\begin{cases} y_1(k) = \frac{x_1(k)}{\sqrt{E\{x_1(k) \times x_1(k)\}}} \\ y_2(k) = \frac{x_2(k)}{\sqrt{E\{x_2(k) \times x_2(k)\}}} \end{cases} \quad (15)$$

进行信号能量归一化, 消除衰落系数影响, 此时, 各路信号最优合成权值等于当前路信号信噪比。根据信号检测结果以及合成目标信号, 分别在功率谱上纯噪声部分通过积分求解噪声功率 P_n , 在目标信号部分求解信

号与噪声功率 P_s 、 P_n , 即可得目标信号信噪比 P_s/P_n , 即当前路目标信号最优合成权值。

3 仿真与测试分析

将不同通道信号注入信号联合接收处理矩阵, 仿真验证参数估计算法能否准确对时频和相位差进行补偿, 实现多路信号的完全对齐, 达成相参合成的增益效果。

3.1 通道信号仿真分析

仿真条件为: 通道信号频偏为 0.1 Hz, 随时间的相位差变化率为 0.099 5 Hz, 初始相位在 $(0 \sim 2\pi)$ 之间随机产生, 信号的信噪比相近, 多通道信号补偿合成仿真结果如图 3~6 所示, 图中 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 表示不同通道信号, A 表示信号幅度。

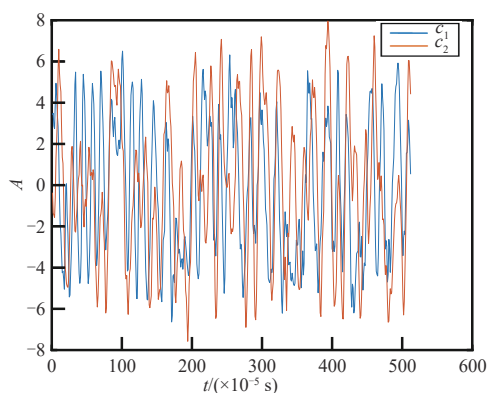


Fig.3 Original two-channel signal
图3 原始两通道信号

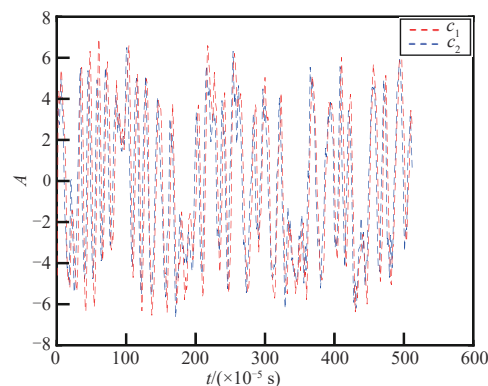


Fig.4 Estimation of compensated alignment signal
图4 估计补偿后对齐信号

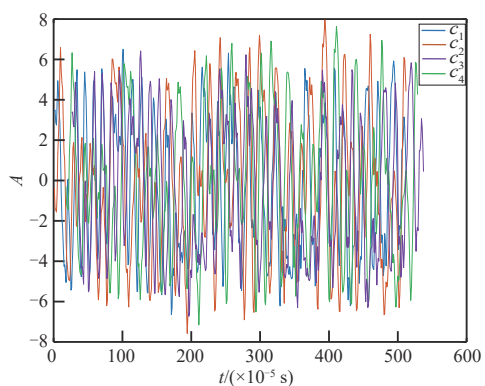


Fig.5 Original Quad Signal
图5 原始四通道信号

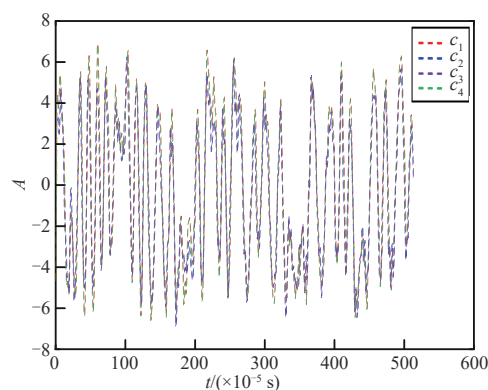


Fig.6 Estimation of compensated alignment signal
图6 估计补偿后对齐信号

从仿真图可看出, 在通道信号样式相同的条件下, 多通道信号能够实现原始信号补偿后对齐, 理论分析与仿真结果趋于一致。因此, 算法能够准确完成信号频偏、时延、相位差补偿, 实现信号的完全对齐, 进而达到相参合成, 提高微弱信号的接收增益。

3.2 实验测试分析

同一矢量信号源经分路器分出两路信号, 并在各路信号中加入相同信道噪声, 将含有信道噪声的两路信号经宽带变频后注入合成矩阵, 设备连接示意图如图 7 所示。

测试过程中, 矢量信号源在 X/Ku/Ka 频段选择不同频率、不同调制样式和符号速率的输入信号。两路输入信号信噪比为 ≥ 7 dB, 9 dB, 且保证两路信号在合成前信噪比差值 ≤ 0.5 dB, 接收增益取联合接收信噪比与合成前两路输入信号信噪比最小值的差值。信号功率取值范围为 $-15 \sim -55$ dBm, 噪声功率取值范围为 $-20 \sim -60$ dBm, 宽带变频固定衰减为 20 dB, 每个频段选择 2 个测试频率, 测试结果如表 1~表 2 所示。

表 1、表 2 测试结果表明, 在 X/Ku/Ka 频段, 当两路信号信噪比 ≥ 7 dB, 9 dB 时(两路信号信噪比差值小于等于

0.5 dB), 双通道信号接收端联合接收增益均值为 2.76 dB, 且对于单路信噪比补偿后合成增益均值分别为 2.74 dB 和 2.77 dB。测试数据表明单路信号信噪比对合成增益的影响并不大, 合成增益提升与天线数量有关, 实际测试满足理论分析结果。理论上 2 个天线组阵合成信号信噪比提升约 3 dB, 考虑实际信号输入过程中, 信号在合成矩阵以及线路之间存在信号衰减损耗, 在上述两种情况下, 该算法联合信号接收增益达到理论值的 92%, 优于文献[13]中的 80% 和文献[14]中的 91%。该联合检测算法对联合信号接收有比较好的合成效果。

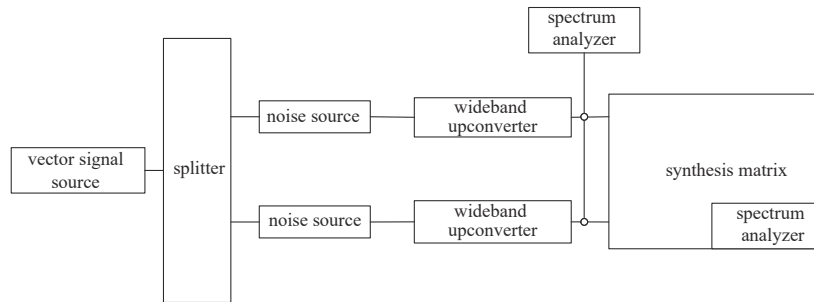


Fig.7 Schematic diagram of experimental system connection
图 7 实验系统连接示意图

表 1 天线联合处理矩阵接收增益
Table1 Antenna joint processing matrix reception gain

frequency/ MHz	modulation style	symbol rate/ ksps	the first way			the second way			joint reception			receive gain/dB
			signal power/ dBm	noise power/ dBm	signal to noise ratio/ dB	signal power/ dBm	noise power/ dBm	signal to noise ratio/ dB	signal power/ dBm	noise power/ dBm	signal to noise ratio /dB	
7 250.5	BPSK	4.8	-47.73	-55.14	7.51	-46.86	-54.27	7.51	-37.36	-47.61	10.25	2.74
7 750.0	QPSK	4 096.0	-15.93	-23.10	7.27	-16.20	-23.23	7.13	-12.20	-22.10	10.05	2.78
1 090.0	BPSK	512.0	-44.25	-53.46	9.31	-43.91	-52.99	9.18	-32.83	-44.85	12.15	2.84
12 745.0	QPSK	4 096.0	-24.61	-31.69	7.18	-23.89	-31.13	7.34	-14.89	-24.68	9.93	2.75
17 700.0	BPSK	64.0	-50.11	-59.39	9.38	-49.89	-59.19	9.40	-35.51	-47.65	12.10	2.72
21 200.0	8PSK	512.0	-16.72	-25.86	9.24	-16.87	-26.07	9.30	-23.35	-35.50	11.97	2.73

表 2 补偿后的接收增益与单路信号信噪比比
Table2 Comparison of compensated synthetic gain and single channel signal to noise ratio

single channel signal-to-noise ratio/dB	9.25	9.24	9.13	9.29	9.21	9.26	9.25	9.30	9.28	9.16	9.19	9.17
receive gain/dB	2.80	2.82	2.80	2.75	2.78	2.76	2.77	2.77	2.80	2.78	2.74	2.75
single channel signal-to-noise ratio/dB	7.11	7.25	7.23	7.15	7.22	7.26	7.14	7.38	7.08	7.25	7.30	7.34
receive gain/dB	2.80	2.68	2.75	2.71	2.82	2.72	2.72	2.79	2.71	2.73	2.69	2.79

4 结论

针对多天线联合接收系统, 本文提出了一种基于时频相位差补偿的信号合成算法, 提高了微弱信号的检测水平。从仿真结果可见, 对于存在时频相位差的接收信号, 算法能够准确计算和补偿偏移量, 从而实现相参合成, 达到提高增益的效果。通过将含有信道噪声的两路信号同时注入合成矩阵, 检测算法在实际应用过程中的可行性。信号合成性能接近理论值, 能够更好地适应于深空微弱信号的接收, 对大规模天线组阵合成具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 徐茂格,柴霖. 我国深空天线组阵技术现状与发展思考[J]. 电讯技术,2014,54(1):109-114. (XU Maoge,CHAI Lin. Technical status and development suggestion of China's deep space antenna arraying[J]. Telecommunication Engineering, 2014,54(1):109-114.) DOI:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.020.
- [2] 卢满宏,李小梅,黄建国,等. 天线组阵全频谱合成性能分析[J]. 飞行器测控学报, 2013,32(5):383-388. (LU Manhong,LI Xiaomei, HUANG Jianguo, et al. Performance analysis of antenna array full spectrum synthesis[J]. Journal of Aircraft Measurement and Control, 2013,32(5):383-388.) DOI:10.7642/j.issn.1674-5620.2013-05-0383-06.
- [3] MILEANT A, HINEDI S. Overview of arraying techniques in the deep space network[R]. TDA Progress Report 42-104. Pasadena,California:Jet Propulsion Laboratory, 1991:109-139.

- [4] 党宏杰,袁嗣杰,史学书. 天线组阵信号 SUMPLE 与 SIMPLE 算法的仿真研究[J]. 装备学院学报, 2008,19(4):78–82. (DANG Hongjie,YUAN Sijie,SHI Xueshu. Simulation research on the SUMPLE and SIMPLE algorithms for antenna array signals[J]. Journal of Equipment College, 2008,19(4):78–82.) DOI:10.3873/j.issn.1673-0127.2008.04.019.
- [5] ROGSTAD D H. The SUMPLE algorithm for aligning arrays of receiving radio antennas: coherence achieved with less hardware and lower combining loss[J]. Interplanetary Network Progress Report, 2005(162):1–29.
- [6] 史学书,王元钦. 深空组阵 Eigen 算法及其低信噪比合成性能分析[J]. 宇航学报, 2009,30(6):2347–2353. (SHI Xueshu,WANG Yuanqin. Deep space array Eigen algorithm and its low signal-to-noise ratio synthesis performance analysis[J]. Journal of Astronautics, 2009,30(6):2347–2353.) DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.048.
- [7] 孔德庆,施浒立. 天线组阵中相位差的递推最小二乘估计与滤波[J]. 宇航学报, 2010,31(1):211–216. (KONG Deqing,SHI Huli. The least squares estimate and filter of phase delay under multi-antennas array[J]. Journal of Aerospace, 2010,31(1):211–216.) DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2010.01.034.
- [8] 夏双志,申建平,赵忠萍. 大规模天线组阵 SUMPLE 合成算法分级实现方法[J]. 无线电工程, 2015,45(9):49–54. (XIA Shuangzhi,SHEN Jianping,ZHAO Zhongping. A hierarchical implementation method for the SUMPLE synthesis algorithm of large scale antenna arrays[J]. Radio Engineering, 2015,45(9):49–54.) DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.048.
- [9] 薛啸,张效义,胡赞鹏,等. 天线组阵中基于 SUMPLE 的联合信号检测[J]. 信号处理, 2017,19(2):245–251. (XUE Xiao,ZHANG Xiaoyi,HU Yunpeng,et al. Joint signal detection based on SUMPLE in antenna arrays[J]. Journal of Signal Processing, 2017,19(2):245–251.) DOI:10.16798/j.issn.1003-0530.2017.02.016.
- [10] 许光旭,冯存前,苏于童,等. 基于高阶模糊函数的进动目标平动补偿[J]. 探测与控制学报, 2019,41(1):113–118. (XU Guangxu,FENG Cunqian,SU Yutong,et al. Compensation for translational motion of moving targets based on high-order fuzzy functions[J]. Journal of Detection and Control, 2019,41(1):113–118.) DOI:CNKI:SUN:XDYX.0.2019-01-022.
- [11] 毛飞龙,焦义文,马宏,等. 基于子空间的宽带信号时延与相位差估计方法[J]. 无线电工程, 2023(4):797–806. (MAO Feilong,JIAO Yiwen,MA Hong,et al. Subspace based broadband signal delay and phase difference estimation method[J]. Radio Engineering, 2023(4):797–806.) DOI:10.3969/j.issn.1003-3106.2023.04.007.
- [12] 查浩然,张召悦,林云. 广播式自动相关监视信号接收系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(1):38–41. (ZHA Haoran,ZHANG Zhaoyue,LIN Yun. Design of automatic dependent surveillance-broadcast signal receiving system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(1):38–41.) DOI:10.11805/TKYDA2019290.
- [13] 薛啸,张效义,胡赞鹏,等. 天线组阵中基于 SUMPLE 的联合信号监测[J]. 信号处理, 2017,33(2):245–251. (XUE Xiao,ZHANG Xiaoyi,HU Yunpeng,et al. Joint signal monitoring based on SUMPLE in antenna arrays[J]. Journal of Signal Processing, 2017,33(2):245–251.) DOI:10.16798/j.issn.1003-0530.2017.02.016.
- [14] 李勇,师民祥. 12 m 深空组阵天线设计与工程实现[J]. 无线电通信技术, 2015,41(5):60–63. (LI Yong,SHI Minxiang. Design and engineering implementation of a 12 m deep space array antenna[J]. Wireless Communication Technology, 2015,41(5):60–63.) DOI:10.3969/j.issn.1003-3114.2015.05.16.

作者简介:

胡春朝(1993–), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为无线通信与通信对抗, email:18437927318@163.com.

谭志强(1977–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为通信与信息系统、通信及通信对抗.

褚家旭(1980–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星通信、卫星通信干扰.

云超(1983–), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为通信与信息系统、通信及通信对抗.