

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209101

基于频域子空间平滑的 MUSIC 时延估计算法

苏佳¹ 曾存良^{1,2} 易卿武² 马天翊² 侯卫民¹(1. 河北科技大学信息科学与工程学院 石家庄 050018; 2. 中国电子科技集团公司第五十四研究所
卫星导航系统与装备技术国家重点实验室 石家庄 050081)

摘要: 时延估计常被用在无线定位测距中,针对多径环境下定位精度下降和时延估计失真的问题,提出了一种基于正交频分复用(OFDM)频域子空间平滑的超分辨率(MUSIC)时延估计算法。首先使信号源经过 OFDM 调制,利用子载波形成数据流;随后在频域对数据流的协方差矩阵作双向平滑处理,使其最大程度的利用信号子空间的数据信息;最后利用 MUSIC 算法下信号/噪声子空间正交性逐一进行谱峰检测,并针对噪声情况对伪谱作归一化处理,从而获得更为准确的时延信息。计算机仿真表明,本文优化算法相对于特征空间 MUSIC 算法具有更高的谱峰和更窄的旁瓣,且无错误估计干扰。在测距信号间隔较近时能够有效解决估计失真问题,最小时延间隔可达 6 ns,分辨能力较强。估计性能层面,可在信噪比为-15 dB 复杂条件下估计精度达到 3 ns 左右,验证了该算法的有效性和优越性。

关键词: 时延估计;OFDM;MUSIC 算法;双向空间平滑

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Time delay estimation based on frequency domain subspace smoothing MUSIC algorithm

Su Jia¹ Zeng Cunliang^{1,2} Yi Qingwu² Ma Tianyi² Hou Weimin¹(1. School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;
2. State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, The 54th Research Institute of China
Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Time delay estimation is often used in wireless positioning and ranging. In multipath environment, there will be problems of positioning accuracy degradation and time delay estimation distortion. To solve this problem, a time delay estimation algorithm based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) frequency domain subspace smoothing on multiple signal classification (MUSIC) is proposed. First, the signal source is modulated by OFDM and the data stream is formed by using subcarriers. Then, the covariance matrix of data stream is bidirectional smoothed in frequency domain to make the best use of the data information of signal subspace. In the end, the signal or noise subspace orthogonality of MUSIC algorithm is used to detect the spectrum peaks one by one, and the pseudo spectrum is normalized to obtain more accurate time delay information. Computer simulation shows that the proposed algorithm has higher spectral peak and narrower sidelobe than the eigen space MUSIC algorithm, and has no error estimation interference. When the ranging signal interval is close, it can effectively solve the problem of estimation distortion. The minimum time delay interval can be close to 6 ns, and the resolution is strong. At the estimation performance level, the estimation accuracy can be close to 3 ns under the complex condition of signal-to-noise ratio of -15 dB, which verifies the effectiveness and superiority of the improved algorithm.

Keywords: time delay estimation; OFDM; MUSIC algorithm; bidirectional spatial smoothing

0 引言

时延估计的准确性可以为用户带来实时、稳定、连续的定位体验,但在实际定位过程中,由于传播环境的复杂性,

传播信道会存在严重的多径、噪声、衰落等现象,尤其在使用定位较为频繁的密集城市小区、室内等,其恶劣的多径环境使得接收到的测距信号产生不同程度的时延,给实时测距精度带来巨大的偏差^[1]。

为了解决以上问题,在无线通信定位体制中,很早就有人将超带宽、WIFI、蓝牙、指纹库等引入进来,但多因成本、部署条件等限制而不能实现大规模部署^[2]。而到达时间(time-of-arrival, TOA)估计的实质就是信号作相关处理,相关的好坏取决于系统的分辨率。于是,超分辨率技术就被引入到了时延估计领域,作为超分辨率技术中典型的多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法更是得到了众多研究学者的重视。Liu 等^[3]把 MUSIC 算法引入到时延估计领域,提出超分辨率 TOA 估计理论,理论上具有无限小的频率分辨。陈峰等^[4]提出一种无需信源数的超分辨率波达角估计算法。该方法利用特定协方差矩阵的最小特征值对应的向量的正交性构建空间谱,并仿真验证了可行性。Chen 等^[5]进行了二维下的波达方向(direction of arrival, DOA)和 TOA 联合估计,为定位时延估计提供了新的视角。在 OFDM 层面,邓中良等^[6]和谢雪等^[7]把正交频分复用(orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM)引入到 MUSIC 算法中,在频域对时延进行了估计,但是二者都只是对其进行了简单分析,对多径路径下间隔较近估计错误的情况并无过多研究。在平滑处理方面,最早由 Evans 等^[8]提出,有效解决了地形散射情况下到达角估计的问题。随后经过 Shan 等^[9]在此基础上进一步改进了一种常用且较有效解决相干情况下预处理问题,但这种解相干的方法是以牺牲阵列的有效孔径为代价,只利用了数据流协方差矩阵对角线上的分块矩阵,牺牲了非对角线上的部分数据信息。为了减少孔径损失, Pillai 等^[10]在之前的基础上,提出了一种双向空间平滑算法,使问题在一定程度上得到改善。在时延估计层面, Zhang 等^[11]在传统的 MUSIC 算法的基础上提出一种基于特征空间的 MUSIC(ES-MUSIC)算法,ES-MUSIC 算法得到的 TOA 估计伪谱旁瓣宽度更窄、谱峰更高,能够有效的对信号源功率进行估计,但是其面对两个以上的信号源时仍无法进行有效估计,且估计精度下降。Bin 等^[12]利用前向平滑和后向平滑在频域引入到 MUSIC 算法中,但是其只给出了多径分量衰落系数及自相关矩阵的满秩条件,对测距

间隔相近的情况并无研究。在间隔较近估计失真问题上,任晓航等^[13]和石要武等^[14]针对波达角提出一种基于特征空间的平滑 MUSIC 算法,小角度下的波达方向估计性能得到了提升,但是并未引入到频域且无法应用到时延估计中。

针对以上问题,本文在特征空间 MUSIC 算法的基础上通过 QPSK-OFDM 系统和双向平滑双重优化,提出了一种基于频域子空间平滑的 MUSIC 时延估计方法,通过最大程度上利用信号子空间数据流信息和信号/噪声子空间的正交性,提升时延估计性能。最后进行了仿真对比分析,验证了本文算法的可行性和针对测距信号间隔较近时估计精度的优越性。

1 时延估计系统

1.1 无线信道模型

一般无线信道的传输特性可以用如下模型表征^[15]:

$$h(t) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k \delta(t - \tau_k) \quad (1)$$

对应信道的频率响应为:

$$H(f) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k e^{j2\pi f \tau_k} \quad (2)$$

其中, L_p 是测距信号在传播过程中由于反射、折射、绕射等现象产生的多径条数, α_k 是因信道衰落产生的信号衰减因子, τ_k 是按到达时间先后顺序排列的时延。在无线定位系统中,要想获得较为准确的定位精度,通常先要获得视距路径(line-of-sight, LOS)路径下的最小时延 τ_0 , 也即测距需要的 TOA 估计值。

1.2 TOA 估计系统

TOA 估计系统如图 1 所示。首先将接收机接受到的测距信号通过无线信道,由系统的无线信道频域冲激响应可知其输出含有多径、衰减、时延等信息。然后对其频域子空间进行双向平滑 MUSIC 算法处理,使得处理的结果含有可以求解时延的估计值,随后通过 TOA 检测模块估计出系统的时延,进而进行定位。

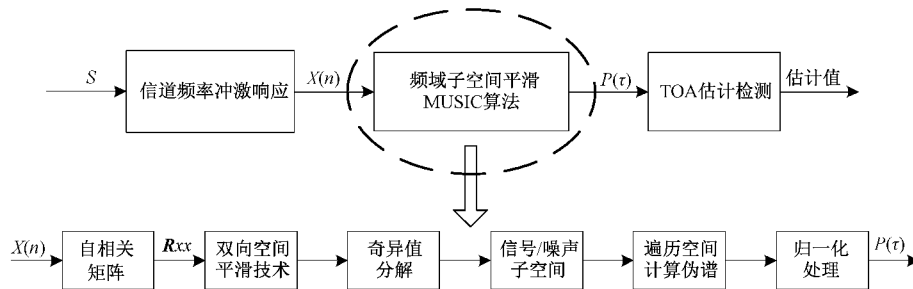


图 1 TOA 估计系统原理框图

在频域子空间平滑 MUSIC 算法中,数据流信息先自相关运算得到协方差矩阵,而后对协方差矩阵进行双向空间平滑处理得到更新后的协方差矩阵,对协方差矩阵进行

特征空间划分,得到噪声子空间和信号子空间,利用二者正交性遍历计算伪谱并归一化处理。

2 时延估计算法优化

2.1 超分辨率 MUSIC 算法

超分辨率 MUSIC 算法是一种基于矩阵特征空间分解的方法。在实际处理中,由于样本数据有限,该算法首先通过对信道冲激响应频域进行频率等间隔采样,采样后的离散频域信道冲激响应为:

$$x(n) = \hat{H}(f_n) = H(f_n) + n(n) = \sum_{k=1}^{L_p-1} \alpha_k e^{-j2\pi(f_0 - n\Delta f)\tau_k} + n(n) \quad (3)$$

将式(3)信号模型转化成向量形式为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{H} + \mathbf{W} = \mathbf{V}\mathbf{a} + \mathbf{W} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [x(0) \ x(1) \ \cdots \ x(N-1)]^T \\ \mathbf{H} &= [H(f_0) \ H(f_1) \ \cdots \ H(f_N-1)]^T \\ \mathbf{W} &= [w(0) \ w(1) \ \cdots \ w(N-1)]^T \\ \mathbf{V} &= [v(\tau_0) \ v(\tau_1) \ \cdots \ v(\tau_{L_p-1})]^T \\ v(\tau_k) &= [1 \ e^{j2\pi\Delta f\tau_k} \ \cdots \ e^{j2\pi(N-1)\Delta f\tau_k}]^T \\ \mathbf{a} &= [\alpha'_0 \ \alpha'_1 \ \cdots \ \alpha'_{L_p-1}]^T \\ \alpha'_k &= \alpha_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k} \end{aligned}$$

超分辨率 MUSIC 算法的核心就是对式(3)信号模型 X 求自相关矩阵,利用奇异值分解将空间划分为相互正交的信号子空间和噪声子空间,自相关矩阵如式(5)所示:

$$\mathbf{R}_{xx} = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\} = \mathbf{V}\mathbf{A}\mathbf{V}^H + \sigma_w^2 \mathbf{I} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{A} = E\{\mathbf{a}\mathbf{a}^H\}$, 由于在信道模型式(1)中预先假设系统的时延都是不同的,由此可知 \mathbf{V} 是列为满秩的矩阵,其列向量呈线性独立关系。而信道模型的衰减因子 α_k 为常数,相位服从均匀分布,式(5)的协方差矩阵为非奇异矩阵。由此可见,信号模型 X 的自相关矩阵 \mathbf{R}_{xx} 是对称的,对其进行特征值分解得:

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H \quad (6)$$

其中, $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_{s_1}^2, \sigma_{s_2}^2, \dots, \sigma_{s_{L_p}}^2, 0, 0, \dots, 0)$ 。由于 \mathbf{A} 是秩为 1 的矩阵,对于 $N > L_p$ 时,有 $\text{rank}(\mathbf{V}\mathbf{A}\mathbf{V}^H) = \text{rank}(\mathbf{A}) = L_p$, 也即:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^H \mathbf{V}\mathbf{A}\mathbf{V}^H \mathbf{U} &= \text{diag}(\sigma_{s_1}^2, \sigma_{s_2}^2, \dots, \sigma_{s_{L_p}}^2, 0, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{U}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{U} &= \mathbf{U}^H \mathbf{V}\mathbf{A}\mathbf{V}^H \mathbf{U} + \sigma_w^2 \mathbf{U}^H \mathbf{U} = \\ &= \text{diag}(\sigma_{s_1}^2, \sigma_{s_2}^2, \dots, \sigma_{s_{L_p}}^2, 0, 0, \dots, 0) + \sigma_w^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (7)$$

由于信号子空间和噪声子空间相互正交,则有:

$$\mathbf{V}^H(\tau_k) \mathbf{U}_n = 0 \quad (8)$$

其中, $\mathbf{U}_n = [u_{l_p-1,1} \ u_{l_p-1,2} \ \cdots \ u_{N-1}]$ 。

通过遍历空间搜索伪谱得:

$$P_{\text{MUSIC}}(\tau) = \frac{1}{\mathbf{V}^H(\tau_k) \mathbf{U}_n} = \frac{1}{\|\mathbf{V}^H(\tau_k) \mathbf{U}_n\|^2} = \frac{1}{\sum_{k=L_p}^{N-1} |v(\tau) u_k^H|^2} \quad (9)$$

基于超分辨率 MUSIC 算法的 TOA 估计主要是通过检测伪谱的峰值,并获取峰值所对应的时延参数来完成 TOA 估计的。

2.2 算法改进思路及原理

算法改进步骤和原理如下:

1) 利用 OFDM 系统子载波形成数据流信息。

在无线信道频域的基础上,建立了 OFDM 频域等效模型,如图 2 所示。

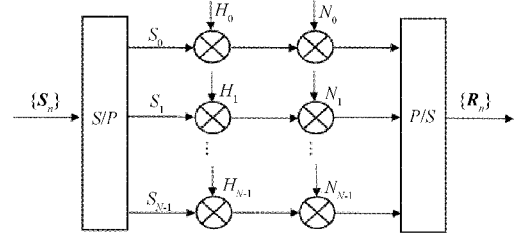


图 2 OFDM 系统的频域等效框图

在频域等效模型中:

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{S}_n + \mathbf{N}_n \quad (10)$$

其中, \mathbf{N}_n 代表第 n 个子信道上的加性噪声,对式(10)进行变换得:

$$\mathbf{H}_{\text{req}} = \mathbf{R}_n / \mathbf{S}_n = \mathbf{H}_n + \mathbf{N}_n / \mathbf{S}_n \quad (11)$$

利用 OFDM 系统的正交子载波将串行数据并行传输,可以有效抑制多径效应对数据流的影响。

2) 对频域数据流的协方差矩阵作双向平滑处理。

由于超分辨率算法是利用对角线上的子空间矩阵进行时延估计的,对于数据流矩阵较大时,非对角线上的小子阵在参与时延估计时会被遗弃,出现一定程度上数据流损失的情况,虽然时延结果可以估计出来,但是在精度方面却出现一定的误差。因此,本文在频域等效模型的基础上,对数据流协方差矩阵进行双向平滑修正,使其最大程度上利用信号子空间中非对角矩阵中的数据信息。协方差矩阵平滑原理如图 3 所示。

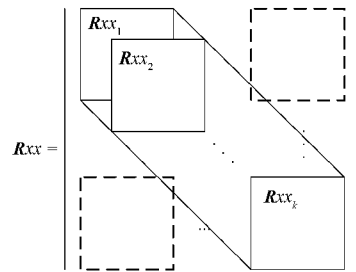


图 3 协方差矩阵平滑原理图

在前向平滑处理中,将数据流的自相关矩阵 \mathbf{R}_{xx} 分成相互交错的 k 个子矩阵,每个子矩阵上包含 n 个子载波携带的数据信息。以第 1 个子矩阵 \mathbf{R}_{xx_1} 为参考矩阵,则每个子阵的数据模型可表示如下:

$$\mathbf{R}_{xx(k)} = [\mathbf{R}_{xx_1} \ \mathbf{R}_{xx_2} \ \cdots \ \mathbf{R}_{xx_{k-1}} \ \mathbf{R}_{xx_k}] = \mathbf{D}^{k-1} \mathbf{R}_{xx} + \mathbf{n}_k \quad (12)$$

其中:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & e^{j\alpha_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & e^{j\alpha_{k-1}} \end{bmatrix}$$

则有:

$$\mathbf{R}_{xx}^f = \left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{D}^{(i-1)} \mathbf{R}_i (\mathbf{D}^{(i-1)})^H + \sigma^2 \mathbf{I} \right) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{R}_i \quad (13)$$

对于后向空间平滑技术,与前向空间平滑原理类似,对反对角线上的数据流协方差矩阵进行了修正处理,有:

$$\mathbf{R}_{xx}^b = \left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{D}^{(m-i-2)} \mathbf{R}_i \mathbf{D}^{-(m-i-2)} + \sigma^2 \mathbf{I} \right) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{J}_m (\mathbf{R}_i)^* \mathbf{J}_m \quad (14)$$

其中, m 为子阵的维数, \mathbf{J}_m 为反对角线上的置换矩阵, $(\mathbf{R}_i)^*$ 为 \mathbf{R}_i 复共轭矩阵。

则双向平滑矩阵为:

$$\mathbf{R}_{xx}^{fb} = \frac{1}{2} (\mathbf{R}_{xx}^f + \mathbf{R}_{xx}^b) \quad (15)$$

3) 将平滑后的协方差矩阵进行超分辨率 MUSIC 算法处理。

将修正后的数据协方差矩阵进行超分辨率 MUSIC 算法处理,得到修正的估计伪谱。考虑到在实际传输系统模型中,加性噪声都是随机的,也即式(12)对应噪声特征值是不同的,会对估计性能造成影响,因此对特征向量对应的特征值进行归一化处理,使得能够更好地面对噪声随机的的问题,归一化如式(16)所示。

$$P_{MUSIC}(\tau) = \frac{1}{\sum_{k=L_p}^{N-1} |v(\tau)u_k^H|^2} = \frac{1}{\lambda_{k k-L_p}} \quad (16)$$

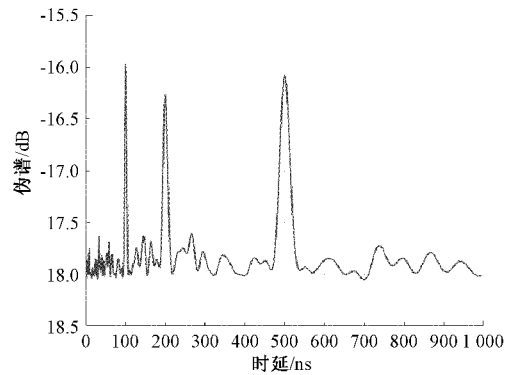
4) 分析伪谱,得出时延估计值。

3 仿真结果与分析

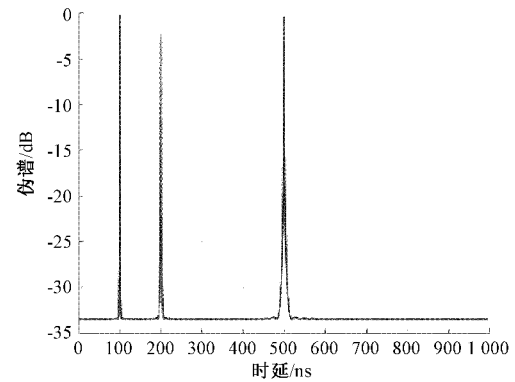
3.1 改进算法可行性仿真与分析

为了验证本文提出算法的可行性,根据以上理论基础对改进算法在不同时延下的伪谱进行了计算机仿真。仿真条件及参数选择依据 3GPP R16 标准,具体设置如下:基于 QPSK-OFDM 系统,信号源采用具有良好自相关特性的 CAZAC 序列中 Zadoff-Chu 序列,子载波数目为 256,信噪比大小为 0 dB,带宽为 20 MHz,平滑阶数为 6。可行性分析中假设系统的时延分别是:100 ns、200 ns、500 ns。采用 ES-MUSIC 算法和频域子空间双向平滑 MUSIC 算法作对比,仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知,ES-MUSIC 算法和本文优化算法均能在需要估计的时延处形成伪谱,但图 4(a)中 ES-MUSIC 算法



(a) 基于ES-MUSIC算法伪谱图



(b) 基于频域子空间双向平滑MUSIC算法伪谱图

图 4 ES-MUSIC 算法与本文算法伪谱对比

仿真结果可以明显看出该算法出现多个谱峰干扰,已经无法进行有效的时延估计;而图 4(b)中的本文优化算法不仅能准确的进行时延估计,且旁瓣较窄,谱峰也很“尖锐”,无错误谱峰干扰,验证了改进算法在时延估计中具有可行性。

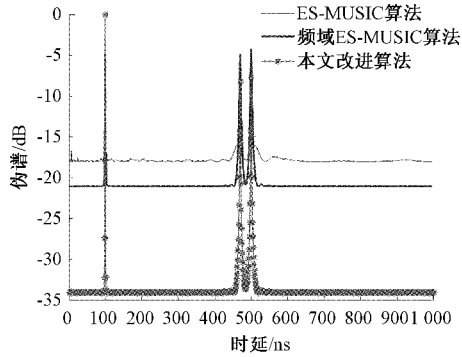
3.2 改进算法有效性仿真与分析

为了验证本文优化算法有效性,分别对 ES-MUSIC 算法,频域 ES-MUSIC 算法和本文改进算法在不同时延间隔的时延估计进行了仿真,分析不同算法的优劣性能。

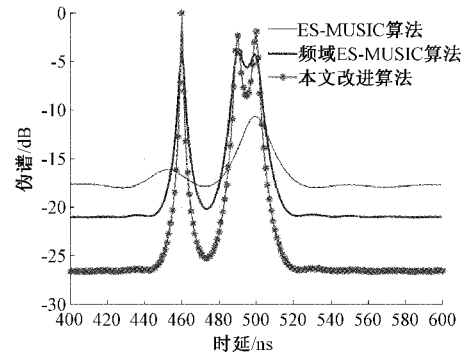
1) 时延间隔随机情况分析

现实定位请求时,定位终端每次定位请求时时延间隔都为随机且具有不确定性,鉴于此,以下分析了优化算法在时延间隔随机时估计性能,仿真条件保持与上面一致,对比分析仿真结果如图 5 所示。

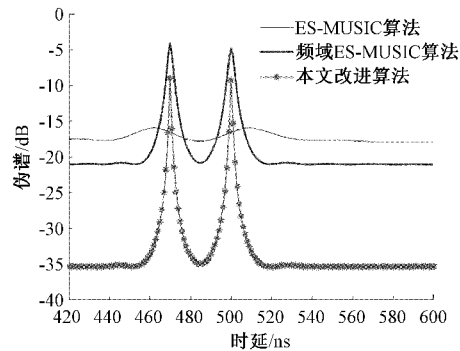
图 5 中的频域 ES-MUSIC 算法是在 ES-MUSIC 算法的基础上引入 OFDM 系统,利用子载波正交性传输数据流,随后在频域进行子空间平滑得到本文改进算法。图 5(b)为图 5(a)在 420~600 ns 之间的局部放大图,如图 5(a)所示,加入 OFDM 系统频域处理后,错误谱峰干扰得到明显改善,且在非估计部分趋于平滑,没有波动,说明该系统稳定性得到大幅度提升。随后,对频域子空间进一步进行双向平滑和伪谱归一化处理,相对于频域 ES-MUSIC 算法可以明显看出其伪谱谱峰出现较大的改善,



(a) 时延间隔随机时延估计图



(b) 非等间隔时延估计图



(b) 时延估计局部图

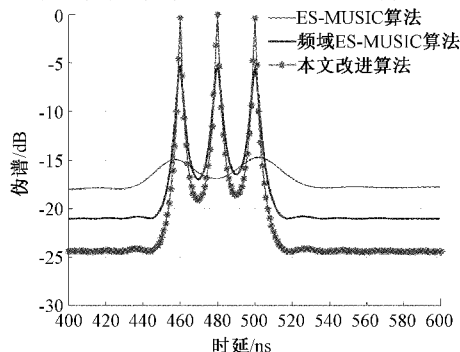
图 5 不同算法下伪谱对比

在幅值上接近于频域 ES-MUSIC 的 2 倍,且旁瓣在相同时刻更窄,均峰值更大。

2) 时延间隔较小情况分析

在时延估计时,间隔较近时会出现伪谱重叠、丢失等错误估计问题,为了进一步验证改进算法在此情况下仍能具有准确的估计性能,对 3 种算法进行了计算机仿真,仿真条件保持与上述一致,时延分别设置等间隔的 460、480、500 ns 和非等间隔的 460、490、500 ns 两组,仿真结果如图 6 所示。

如图 6(a)、(b)所示,ES-MUSIC 算法当间隔较近时,发生伪谱重叠,导致出现估计错误和估计遗漏的现象,此时该算法已经无法进行有效的时延估计。对比频域 ES-MUSIC 算法和本文改进算法,频域 ES-MUSIC 算法虽然可以进行有效估计,但性能出现明显下降;而经过子空



(a) 等间隔时延估计图

图 6 不同间隔下 3 种算法对比

间平滑和归一化处理,改进算法在同一时刻下谱峰提高将近 1/3,时延估计性能得到提升。为探究 3 种算法下估计失真时的最小间隔,对 3 种算法数据进行统计,结果如表 1 所示。

表 1 不同间隔下 3 种算法性能对比

性能指标	算法		
	ES-MUSIC	频域 ES-MUSIC	优化算法
最小失真间隔/ns	22.5	8.5	6.0
伪谱均值/dB	-17.74	-20.50	-26.31
伪谱幅度极值/dB	7.34	17.76	26.58

由仿真数据可知,本文算法估计最小失真间隔可至 6 ns,远低于 ES-MUSIC 算法,且优于频域 ES-MUSIC 算法。在伪谱均值方面,本文算法明显低于 ES-MUSIC 算法和频域 ES-MUSIC 算法,在同等情况下改进算法更易检测出时延估计;在幅度谱峰值方面,本文算法相对于 ES-MUSIC 算法提升近 3 倍,相对于频域 ES-MUSIC 算法提升近 1/3;旁瓣在任何时刻都窄于其他两种算法。如图 6(a)所示,以上性能在等间隔情况下同样成立,验证了改进算法具有更强的稳定性和优越性。

3.3 改进算法估计性能仿真与分析

为了进一步验证优化算法的估计性能的优越性,在不同信噪比下对不同算法进行了仿真对比分析。同时为了增加仿真结果的可信度,在 3.2 节的基础上引入了 ESPRIT 算法和 Monte-Carlo 实验:

1) ESPRIT 是一种空间谱估计算法,同 MUSIC 算法一样,被广泛的运用在伪谱估计中^[16-17]。

2) Monte-Carlo 是一种统计学重复实验^[18]。由于每一次仿真产生的时延误差都是随机的,鉴于实验结果的准确性,对每种算法进行了 10 000 次 Monte-Carlo 实验,以 ESPRIT 算法为例,不同次数的仿真结果如图 7 所示。

由图 7 仿真结果可以看出,仿真次数分别为 1 次、100 次时,估计出的时延出现很大的抖动,具有很大的随机性,得

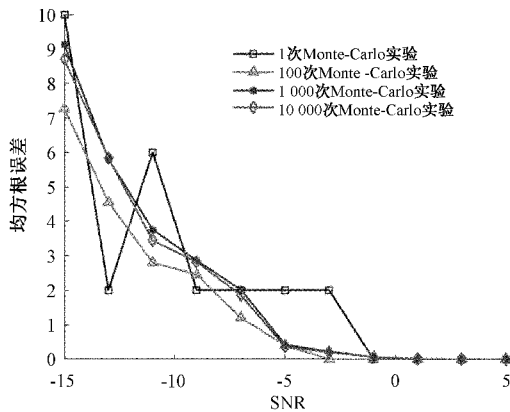


图 7 蒙特卡罗实验仿真图

出的结果会有很大的误差。当试验次数在 1 000 次以上时,时延估计得到了较好的改善,但局部区域仍会有较小的抖动;当试验次数在 10 000 次时,时延估计误差曲线接近平滑。因此,蒙特卡罗实验是必要的,以下仿真都是在 10 000 次蒙特卡罗实验的基础进行的。

子载波个数对时延估计精度也会有一定的影响,为了探讨改进算法在此方面的性能,分别研究了不同子载波数下改进算法的估计精度,仿真结果如图 8 所示。

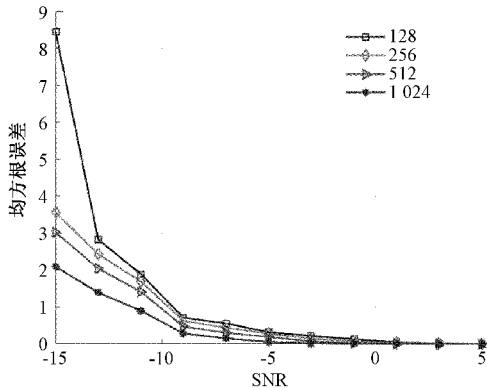


图 8 不同子载波下优化算法仿真图

考虑到目前现有 LTE 网络的子载波间隔为固定 15 kHz,5G NR 网络的子载波间隔虽然可调,但最低也为 15 kHz 的现实情况,若单个带宽内子载波数量太大会使得仿真结果过于理想,而在现实应用时估计性能会有所缩减,因此,本次仿真选择在子载波数量较小条件下进行。由图 8 所知,在单个子载波条件下,估计精度随着信噪比的增加而逐渐增强。在相同信噪比下,改进算法的估计精度会随着子载波个数的增加而得到改善,

时延估计精度是算法优劣一个主要指标,在分析了以上各自种因素对时延估计结果影响的条件下,进一步分析不同算法下的估计精度情况。如图 9 所示,为了确保结果的可靠性,除子载波数统一为 512 外,其他仿真条件均与上面保持一致。

仿真表明,3 种算法在定位信号较强时均能获得较为

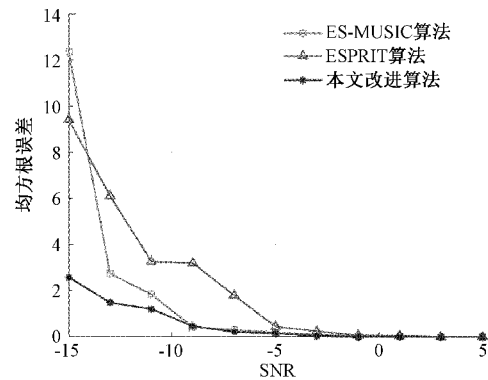


图 9 不同算法下估计性能对比

准确的时延估计信息,在定位信号较弱时,本文改进算法的估计精度均优于 ES-MUSIC 和 ESPRIT 算法,其中,在 $-15 \sim -5$ dB 环境下,ESPRIT 算法估计性能快速下降;ES-MUSIC 算法在 -9 dB 时估计性能出现变化,且变化速率较快,时延估计出现较大偏差;而本文改进算法整体变化趋势趋于平稳,且在信噪比为 -15 dB 的复杂环境下仍可达到 3 ns 的估计误差,具有较高的估计精度。

4 结 论

本文将空间平滑技术引入到时延估计中,考虑到实际传输环境中的多径情况,建立了无线信道传输模型,并转换到频域,提出了一种基于频域子空间平滑的 MUSIC 时延估计算法,充分利用了 OFDM 子载波和 MUSIC 算法信号/噪声子空间的正交性。该算法相对于 ES-MUSIC 算法增加了 QPSK-OFDM 传输系统和子空间平滑优化,并且针对噪声随机的情况对伪谱进行了归一化处理。在 ES-MUSIC 算法、频域 ES-MUSIC 算法和本文优化算法三者的对比仿真中,优化算法无论在峰值,旁瓣宽度,错误干扰等方面均明显优于其他两种算法,且最小估计失真间隔可达 6 ns,在一定程度上解决了实时移动过程中突然某个时刻出现定位较大偏差的问题,说明该改进算法具有更高的分辨率。在估计性能方面,优化算法在复杂的噪声环境下,可以有效的进行时延估计,在 -15 dB 的 SNR 下可以达到 3 ns 左右的估计误差,具有优越的估计性能。

参考文献

- [1] 郑自兴,姚金杰. 基于信号强度的指纹定位匹配算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 31(9): 31-35.
- [2] MONICA S, BERGENTI F. Hybrid indoor localization using WiFi and UWB technologies [J]. Electronics, 2019, 8(3): 334.
- [3] LIU X L, LI Z, LIU X Y, et al. Power allocation in vector estimation systems with the impact of wireless channel uncertainty [J]. International Journal of Communication Systems, 2017, 30(3), DOI: 10. 1002/ dac. 2966.

- [4] 陈峰,杨德森,桂晨阳,等.一种无需信源数目的方位估计方法[J].哈尔滨工程大学学报,2020,41(10):1414-1418.
- [5] CHEN L, QI W, LIU P, et al. Low-complexity joint 2-D DOA and TOA estimation for multipath OFDM signals[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(11): 1583-1587.
- [6] 邓中亮,尹露,唐诗浩,等.室内定位关键技术综述[J].导航定位与授时,2018,5(3):14-23.
- [7] 谢雪,王浩祥,邓平.一种基于单次散射体定位的 TOA/AOA 混合定位算法[J].电讯技术,2022,62(1):110-115.
- [8] EVANS J E, JOHNSON J R, SUN D F. High resolution angular spectrum estimation techniques for terrain scattering analysis and angle of arrival estimation [C]. Processing 1st ASSP Workshop Spectral Estimation, Hamilton, Ontario Canada, 1981:134-139.
- [9] SHAN T J, WAX M, LAILATH T. On spatial smoothing for estimation of coherent signals[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1985,33(4): 806-811.
- [10] PILLAI S U, KWON B H. Forward/backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing,1989,37(1):8-15.
- [11] ZHANG X F, LU W, SHI Y, et al. A novel DOA estimation algorithm based on eigen space[C]. IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Hangzhou, China,2007:551-554.
- [12] BIN B, YUN L W, NA E Z, et al. TOA estimation based on forward and backward smoothing MUSIC in frequency domain[C]. AMCCE, 2015:2344-2349.
- [13] 任晓航,单宝堂,吴昊.新型快速 DOA 估计算法[J].国外电子测量技术,2016,35(8):22-25.
- [14] 石要武,陈森,单泽涛,等.基于特征空间 MUSIC 算法的相干信号波达方向空间平滑估计[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(1):268-273.
- [15] 何怡刚,隋永波,FARHAN ALI,等.自适应 OFDM 系统的时域信道预测研究[J].电子测量与仪器学报,2021,245(5):100-110.
- [16] 蔡星月,高云鹏,李云峰,等.基于自适应 TLS-ESPRIT 和改进全相位多密集谱间谐波检测[J].仪器仪表学报,2020,41(12):199-207.
- [17] 范文泉,肖文书.基于 MUSIC 和 ESPRIT 算法的 DOA 动态布站[J].电子测量技术,2019,42(2):142-148.
- [18] 宋玲,姜小玉,黄晓冬.基于临时锚节点的改进蒙特卡罗节点定位算法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(2):89-94.

作者简介

苏佳,博士,主要研究方向为无线通信技术和图像处理。

E-mail:sujia@hebust.edu.cn

曾存良,硕士研究生、主要研究方向为通信导航一体化。

E-mail:ZCL1301281922@163.com

易卿武,研究员,主要研究方向为卫星导航系统与设备、时间频率。

E-mail:13933827718@139.com

马天翔,博士后,主要研究方向为高精度卫星导航定位技术,无线通信。

E-mail:matianyi@tsinghua.EDU.CN

侯卫民,博士,主要研究方向为阵列信号处理、无线通信、遥感信号处理。

E-mail:hwm@hebust.edu.cn