

文章编号: 2095-4980(2023)04-0472-10

面向自组网的通感融合技术及软硬件设计

沈 渊, 胡可可*, 孙 铭, 韩 东, 申 啸

(清华大学 电子工程系, 北京 100091)

摘 要: 现有自组网通信和导航技术缺乏深度融合的框架和方法, 在未来场景下难以保障未来“智慧城市”、“智能出行”等场景对通信感知的综合性需求, 因此研究面向物联网、车联网等自组织网络的通感融合(ISAC)技术成为亟待解决的问题。本文针对自组网通感需求, 提出了通信感知信号融合方法和技术方案, 可在保障通信性能的同时提高测距感知估计精确度。针对自组网设备间、通感任务间资源需求冲突等问题, 依据自组网集群业务需求, 构建了保障通信需求的定位感知网络时频资源优化框架, 设计了联合资源分配方案及相应迭代优化算法, 实现有限资源情况下的高可靠、强稳定自组网协同感知能力。针对当前自组网通信模组存在时延高、网络覆盖范围小、感知能力缺失等问题, 设计并搭建了通感一体化模块原型样机 I 型, 可在卫导数据缺失下提供全网高精度时钟同步, 保障集群协同感知能力, 并在长距离下提供自组网通信协同传输支撑, 从硬件设备上为通感融合提供支撑。最终形成了一套包含通感信号融合设计、时频资源联合优化方案的自组网通信感知系统框架, 并研制搭建了一套通感融合软硬件平台(含通感一体化原型样机 4 台)。在外场测试中, 2 km 内通信速率 ≥ 320 kbps, 丢包率 $\leq 0.05\%$, 感知精确度优于 10 m。

关键词: 通感融合; 功率分配; 自组网

中图分类号: TN915.03

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023027

ISAC technologies and hardware–software design for Ad Hoc network

SHEN Yuan, HU Keke*, SUN Ming, HAN Dong, SHEN Xiao

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100091, China)

Abstract: The existing Integrated Sensing And Communication(ISAC) technologies lack the framework and methods of deep integration, and it is difficult to guarantee the comprehensive demand of communication perception in future scenarios like "smart city" and "intelligent travel". Therefore, it is an urgent problem to study the ISAC technologies for Ad Hoc networks oriented to Internet of Things and the Internet of Vehicles. The method and technical scheme of the sensing–communication signal integration for Ad Hoc network are proposed, which can both guarantee the communication performance and improve the accuracy of ranging sensing estimation. A resource allocation scheme and its corresponding iterative optimization algorithm are proposed to deal with the time–spectrum resource conflict between sensing and communication tasks, in order to achieve the high reliability and strong stability of the ISAC Ad Hoc network collaborative awareness ability under limited resources. A hardware–software module prototype of sensing–communication integration is designed to guarantee high–precision clock synchronization of the whole network when Global Navigation Satellite System(GNSS) signal is weak, ensuring the collaborative sensing ability of the network, and providing the collaborative transmission support in long distances communication. In conclusion, an ISAC Ad Hoc system framework is built, including the integrated design of the sensing–communication signal and the joint optimization scheme of time–frequency resource; the corresponding hardware–software platform is developed, consisting of 4 ISAC module prototypes. In the field experiments of the corresponding platform within a range of 2 km, the proposed method can realize that the communication rate is above 320 kbps, the packet loss rate is less than 0.05%, and the sensing accuracy is less than 10 m.

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-03-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFC1511803)

*通信作者: 胡可可 email:hukeke@tsinghua.edu.cn

Keywords: integrated sensing and communication; power allocation; Ad Hoc network

无线电通信与无线电导航本质上都是基于无线电收发及信号处理的应用系统，但2个系统在信息传输、信号测量方面的侧重点不同，导致其信号体制在长期以来保持着独立的、差异化的设计，并沿着各自的路线演进。近年来，随着基于位置服务(Location Based Services, LBS)的发展，工业物联网、车联网等概念的兴起，定位、导航和授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)和通信的功能开始变得密不可分，通感融合的重要性越来越明显。传统通感分立设计上的改良难以实现对未来移动网络智能化、信息化、可视化、扁平化等需求的支撑^[1-2]，特别是城市室内定位感知面临着卫星信号弱、遮蔽严重等问题。传统卫星导航系统及相关增强系统无法满足“智慧城市”、“智能出行”等场景需求，研究通信感知一体化技术，实现物理世界与信息世界的高效连接，是未来军民通信网络主要发展方向之一^[3-6]。早在2013年，美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)就启动了“雷达通信频谱共享”的专用项目^[7]，并在2020年成立了“太赫兹与感知融合技术研究中心”，将高容量与高精度通信感知一体化作为关键技术^[8]。我国自然科学基金委和科技部也对相关方向进行立项，“面向雷达协同探测的无线通信组网理论与技术”、“区域协同遥感监测与应急服务技术体系”等国家相关项目相继获批。近年来，国内外产学研相关研究主要涵盖通信感知一体化理论、波形设计与信号处理、网络资源分配与信息融合3个方面。

通感一体化理论基于通信与感知性能，将包括吞吐量、误码率、通信时延等在内的通信性能指标与包括感知精确度、检测概率、覆盖范围等在内的感知性能指标统一在同一框架下进行分析与研究^[9-10]。2016年，Chiriyath等将雷达性能等效至通信互信息的框架下，提出了雷达“估计速率”的定义，并将雷达对“目标参数不确定性的消除”定义为雷达与目标之间的互信息，以此导出了估计速率的上界^[11]。2017年，LIU等提出通过计算通信与雷达的互信息将二者性能指标统一的方式^[12]。2020年，Kumari等以基于率失真理论的等效均方误差为性能评价指标，将通信符号的最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)等效到无偏估计量的克拉美罗界(Cramer-Rao Bound, CRB)^[13]。

通信感知一体化波形设计与信号处理从信号层面考虑，旨在实现“信号共用”这一目标。通感波形复用研究起步较早，1963年，Randal等就提出基于脉冲间隔调制的方式，实现在发送雷达信号的同时传送通信符号^[14]。前期研究主要围绕雷达信号字符传输问题，通信速率先天上限不高^[15-16]。随着MIMO雷达的出现，2015年，Hassanien等提出在雷达波束的副瓣通过幅移键控与相移键控来调制通信符号^[17-19]。2018年，Liu等提出在下行通信的同时进行雷达目标探测，利用MIMO雷达的空域自由度，在不影响通信速率的情况下进行目标探测^[20]。2020年，Gaudio等提出了基于正交时频空(Orthogonal Time Frequency Space, OTFS)调制的通信感知一体化系统，通过在时延-多普勒域传输信号，有效解决时变信道的影响^[21]。

网络资源分配与信息融合引入网络协同概念，通过多节点协作方式，根据任务及业务需求，综合性地提升网络集群整体感知精确度、覆盖范围、通信速率以及质量^[22-26]。2018年，Kilani等在多站场景下对通信与目标感知的性能进行了分析^[27]。2019年，Zhang等提出了基于多波束的雷达通信一体化设计方案，分别设计方向性波束与扫描波束，实现通信及感知功能^[28]。Wang等利用环境中的机会通信信号源，提出了基于多节点协同的目标探测与跟踪方法^[29]。

从国内外相关研究现状看，通信感知一体化理论及相关技术研究尚处于起步阶段，大部分为满足通信或感知业务需求后，兼顾其他业务服务，难以根据通感业务自适应弹性调整。尤其在硬件实现上，目前军民相关设备出于成本及实用效率考量，在选料及开发上进行单一项优化，难以支撑通感技术开发、调试及测评任务。本文围绕自组网内通感融合技术理论问题及相关软硬件缺失问题，基于一体化框架，分析了通感综合性能，并设计了一套包含通感信号融合设计、时频资源联合优化方案的自组网通信感知系统框架，研制并搭建了一套通感融合模组验证平台。

1 通感信号融合及视频复用技术

1.1 通感信号耦合性能建模及分析

通感一体化信号在复杂室内环境下受多径效应影响，存在信道特性复杂、信号建模困难等问题，本节通过刻画信道的时频特性并建立准确的信号模型，推导出通感融合性能边界。

将主动节点发送的信号建模为 $s(t; \mathbf{x})$ ，其中 \mathbf{x} 为调制的通信序列， $s(t)$ 为一体化信号，取决于具体调制方式。如采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制， $s(t; \mathbf{x})$ 便代表一个调制了通信序列

的 OFDM 符号, 其具体表达式为:

$$s(t, \mathbf{x}) = \left(\sum_{k \in K} x_k \cos(2\pi(f_c + f_k)t + \phi_k) \right) g_0(t), t \in [0, T_{cp}) \quad (1)$$

式中: K 为子载波数; f_c 为中心频点; f_k 为第 k 个子载波对应的频偏; ϕ_k 为第 k 个子载波上的初始相位; $g_0(t)$ 为引入的循环前缀; T_{cp} 为循环前缀的长度; x_k 为调制在第 k 个子载波上的通信符号。引入噪声调幅信号, 其表达式为:

$$I_{\text{active}}(t) = [U_0 + U(t)] \cos(2\pi f_i t + \phi) \quad (2)$$

式中: U_0 为载波电压; $U(t)$ 为均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯带限白噪声; ϕ 为初始相位, $\phi \sim \mathcal{U}(0, 2\pi)$ 为均匀分布的随机变量, 与 $U(t)$ 互相独立; f_i 为噪声信号频率, 是一个常数。

基于 N_t 和 N_r 个阵元构成多发多收信道模型, 接收阵列中第 j 根天线所接收到的信号为:

$$r_j(t) = \sum_{k=1}^{N_t} \sum_{l=0}^{L-1} s_k [t - \tau_l - \tau_{kj} - \tau_d(t), x_k] \quad (3)$$

式中: τ_l 为多径时延; τ_{kj} 为阵列时延; $\tau_d(t)$ 为信道的频域特性, 体现为时变项。

令信道的时域特性体现在多径时延 τ_l 上, 其表达式为 $\tau_l = \tau_0 + b_l$, 其中 τ_0 为直达径时延, b_l 为第 l 条径对应的时延偏置。对于发射端和接收端, 若分别记其位置为 p_t 和 p_r , 则 $\tau_0 = \|p_r - p_t\|_2 / c$ 。注意, 经过感知目标反射的通感融合信号也属于多径信号。假设 τ_1 为反射径时延, p_0 为目标位置, 则其表达式为:

$$\tau_1 = \|p_r - p_0\|_2 / c + \|p_t - p_0\|_2 / c \quad (4)$$

信道的空域特性体现在阵列时延 τ_{kj} , 描述收发端天线阵列几何结构对于一体化信号的影响, 其表达式为:

$$\tau_{kj} = \frac{-d_{r,k} \cos \Delta_{r,k}^{(j)}}{c} + \frac{d_{t,j} \cos \Delta_{t,j}^{(j)}}{c} \quad (5)$$

式中: $d_{r,k}, d_{t,j}$ 分别为收发阵列阵元 k, j 相对于阵列中心的距离; $\Delta_{r,k}^{(j)} = \phi_r^{(j)} - \psi_{r,k}, \psi_{r,k}$ 为接收阵元 k 相对阵列朝向的角度; $\Delta_{t,j}^{(j)}$ 具有类似形式。

信道的频域特性体现为时变项 $\tau_d(t)$, 描述多普勒效应对于一体化信号的影响, 其表达式为:

$$\tau_d(t) = \frac{tv \cos \theta}{c - v \cos \theta} \quad (6)$$

式中: v 为相对运动速率; θ 为方向同节点间连线夹角。若信号的基带带宽较小, 该时变项可进一步等效为多普勒频偏 $\Delta f = fv(\cos \theta)/c$ 。

引入条件分布 $p(\hat{\mathbf{X}}|\mathbf{X})$ 刻画接收端对于通信序列解调的准确程度, 即通信误码率。理想情况下, $p(\hat{\mathbf{X}}|\mathbf{X}) = \delta(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})$, 即接收端总能准确恢复出一体化信号中的调制序列 \mathbf{x} 时, 通信不再约束感知性能, 换言之, 通信与感知解耦。这种情况下, 可以通过克拉美罗界(CRB)表征参数估计的精确度极限。CRB 的刻画通过计算费歇尔信息矩阵(Fisher Information Matrix, FIM)获得, FIM 信息量越大, 感知精确度越高。可以证明, 给定目标位置 p_0 、运动速率 v 、运动方向 θ 等参数, FIM 取决于距离信息强度 λ_r , 其具体表达式简化为:

$$J \cong (1 - \epsilon(\lambda_r)) J_{\text{perfect}} + \epsilon(\lambda_r) J_{\text{mismatch}} \quad (7)$$

式中: ϵ 为关于距离信息强度 λ_r 的函数, 取值在 0~1 之间, 当信息强度越接近场景极限, 其值越接近 1; $J_{\text{perfect}}, J_{\text{mismatch}}$ 分别为正确估计信号感知信息的信息子块、错误估计信号感知信息的信息子块, 取决于网络拓扑结构, 且 $J_{\text{mismatch}} < J_{\text{perfect}}$ 。

式(7)说明, 感知性能受信息强度影响极大。而信息强度一般由信道以及一体化信号共同决定, 以距离信息强度 λ_r 为例, 其表达式为:

$$\lambda_r = \frac{8\pi^2 \beta^2}{c^2} (1 - \chi) R_{\text{SN}} \quad (8)$$

式中: β 为波形的等效带宽; χ 为路径重叠系数, 与多径信道、译码有关, 取值在 0~1 之间, 当 χ 值为 0 时, ϵ 为 0; 当 χ 值为 1 时, ϵ 为 1。对于存在译码错误 $p(\hat{\mathbf{X}}|\mathbf{X})$ 的场景, 本文采用贝叶斯卡拉美罗界与模型失配下的克拉美罗界的模型框架, 分析译码错误对于信息强度的影响。具体关系体现为: 译码错误概率越大, 值越大, 由此可见通信性能可以影响感知性能。

围绕一体化系统中感知对于通信性能的影响，基于前述系统及信号模型，接收端信号经过采样和解调后的离散信号模型可表示为：

$$r = \hat{H}x + n_{\text{noise}} \quad (9)$$

式中： r, x 分别为接收端解调和发射端传输的通信序列； n_{noise} 为接收端白噪声； $\hat{H} = \text{diag}\{\hat{H}_1, \hat{H}_2, \dots, \hat{H}_k\}$ 为接收端对 OFDM 各子载波信道的估计。假设估计方差由 $\sigma_c^2 \mathbf{I}$ 刻画，此时在一定的功率额度下，信道容量表达式为：

$$C = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} E \left(\log_2 \left| \det \left[\mathbf{I}_{N_t} + \frac{R_{\text{SIN}} \hat{H}_k \hat{H}_k^+}{KN_t} \times \frac{1}{1 + R_{\text{SIN}} \sigma_c^2} \right] \right| \right) \quad (10)$$

由此可知，信道容量受信道估计精确度 σ_c^2 和接收信号信干噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 影响。SINR 与环境噪声性能有关， σ_c^2 与目标感知性能有关。图 1 仿真对比了通感融合在不同约束下有限码长性能上下界。由仿真结果可知，测距感知性能要求越高，则通信速率上下界降低；测距感知性能要求越低，则通信速率越渐进逼近香农限。反之，可推断，低通信速率下，信号确定性越高，测距感知信息获取越多；高通信速率下，数据段信号确定性下降，测距感知可获得信息较少。

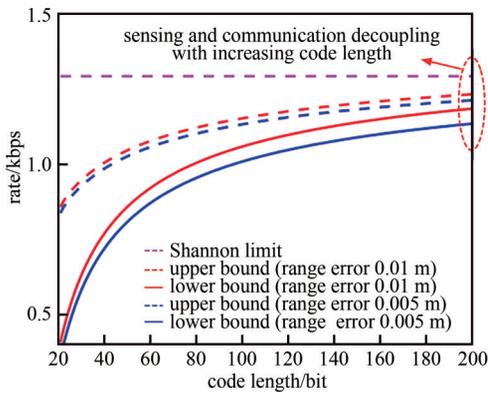


Fig.1 Rate vs. code length under sensing constraint
图 1 测距感知性能约束下,通信速率 vs 码长

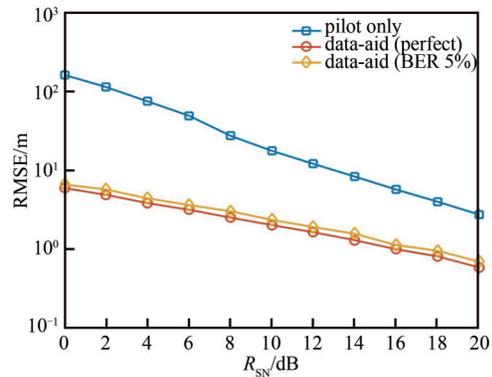


Fig.2 Sensing performance comparison of RMSE with different SNRs
图 2 不同信噪比下感知精确度估计 RMSE

为进一步在实际应用中对通感性能进行对比分析，基于 USRP X310 设备，在空旷场景下发送实际通信信号：载频 2.4 GHz，带宽 20 MHz；数据长度 17 920，约 350 μs ；采样频率 50 MHz，间隔 20 ns。其中导频长度 512，两设备间隔固定，发送设备功率步进为 2 dB，每次接收设备记录总计约 400 帧数据。结果如图 2 所示，数据融合方案相比只采用导频的时分方案，效果提升一个数量级；在误码率为 5% 情况下，比无误码情况下性能差。实测结果说明，用于感知的信号有效信息越多，感知性能越好，从侧面验证了通信导航性能分析框架的正确性。此外，对比了存在误码及无误码下感知结果性能，误码率越低，测距感知性能越好。同时，实验环境内，10 MHz 带宽射频信号在无误码下，估计精确度可达 0.5 m，与式(7)通感融合性能边界分析相吻合。

1.2 多制式通感融合方案设计

基于通感信号耦合性能建模与分析结论，对多制式编码调制、同频时分、多频异构、同频异构耦合等方案的性能展开分析。

1) 时分策略

时分策略与现有 LTE(Long-Term Evolution)-PRS(Positioning Reference Signal)方案类似，根据实时通信与感知需求调整通信帧与感知帧长度，接收端可在一个时隙内同时满足测感知与通信的需求，帧结构设计如图 3 所示。通信及感知性能详见表 1。

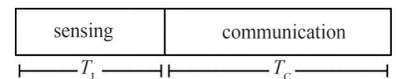


Fig.3 Time division strategy
图 3 通感信号时分策略示意图

2) 频分策略

频分策略对接收机要求相对复杂，需要接收机有较好的滤波接收能力。同时，也需考虑频段间的导频插值、保护间隔设计。频分结构帧结构如图 4 所示。通信及感知性能详见表 1。

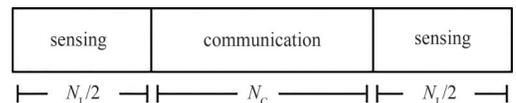


Fig.4 Frequency division strategy
图 4 通感信号频分策略示意图

3) 扩频感知/(非)扩频通信载波复用技术

传统时分、频分方案在本质上是通感信号松耦合形式，需要考虑信号间的干扰、设计间隔，可能还需要设计均衡器、干扰消除等算法，降低影响。基于非平衡 QPSK(Unbalanced Quadrature Phase Shift Keying, UQPSK)调制体制，令发送方在同相 I 支路上调制低速扩频通信数据，在正交 Q 支路上调制高速非扩频(扩频)通信数据，即 Q 支路可以根据通信数据速率来选择扩频或不扩频。接收端首先对 I 支路信号进行解调制扩处理，实现设备间低速业务(如控制命令等)与测量任务，然后对 Q 支路进行载波恢复和时钟恢复后解调高速数据(可以利用 I 支路的测量信息，如多普勒频移用于辅助 Q 支路载波恢复、时钟恢复)，实现设备间高速通信数传业务，二者独立互不干扰。帧结构如图 5 所示，通信及感知性能详见表 1。

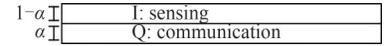


Fig.5 Spread spectrum sensing/non-spread spectrum communication multiplexing
图 5 扩频感知/(非)扩频通信载波复用技术

表 1 各制式通信感知性能关系

Table1 The relationship between communication and sensing for different ISAC strategies

ISAC strategies	communication rate	sensing performance
time division	$R = \frac{T_c}{T} \log_2(1 + R_{SN})$	$J = \frac{T_s}{T} \times \frac{8\pi^2 \int_{-B/2}^{B/2} f^2 S(f) ^2 df}{c^2 N_0/2} (1 - \chi(\alpha, \tau))$
frequency division	$R = \int_{-N_c/2}^{N_c/2} \log_2 \left(1 + \frac{ H(f) ^2 S(f) ^2}{N_0/2} \right) df$	$J = \frac{16\pi^2 \int_{N_c/2}^{(N_c+N_s)/2} f^2 S(f) ^2 df}{c^2 N_0/2} (1 - \chi(\alpha, \tau))$
spread spectrum sensing/non-spread spectrum communication multiplexing	$R = \alpha \log_2(1 + R_{SN}) + 1$	$J = (1 - \alpha) \frac{8\pi^2 \int_{-B/2}^{B/2} f^2 S(f) ^2 df}{c^2 N_0/2} (1 - \chi(\alpha, \tau))$
data-aid ISAC method	$R = \frac{T_d}{T} \log_2(1 + R_{SN})$	$J = \frac{8\pi^2 \int_{-B/2}^{B/2} f^2 S(f) ^2 df}{c^2 N_0/2} (1 - \chi(\alpha, \tau))$

4) 数据辅助(data-aid)通感融合技术

在目标运动相对低速情况下，上一时刻或较近时间的位置距离变化较小，两者之间因时延导致的位置变化对感知估计影响近乎为零。如图 6 所示，数据辅助方案基于上一段时间的观测信号，在信号调制解调、解码后，将获取的数据信号联合上一时刻的导频信号，重新代入观测信号中去估计更为准确的信道冲击响应(Channel Impulse Response, CIR)/信道状态信息(Channel State Information, CSI)，从而估计出上一时隙更为准确的信号到达时间标记。该方案在室内低速运动场景下，可在不影响通信的情况下实现高精度感知，但需要对现场可编程逻辑阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)时钟模块重新设计，对硬件缓存有额外需求。

在多节点网络环境下，由于存在各用户间的同频信号干扰，在给定的网络时频资源条件下，网络内平均速率与感知精确度都会下降，仿真结果如图 7 所示。仿真结果对比了单个用户与锚点(有位置基准点)、三用户协作(有锚点)场景下的位置估计误差下界(Position estimation Error Bound, PEB)与通信速率，可见频分策略比时分策略的通感联合效率要高一些。此外，由于多用户在单位范围内相互影响，单一用户通信速率会下降，导致通感联合效率下降，但由于三节点可通过几何约束以及协作信息，提高感知精确度，仿真结果基本符合理论规律。此外，采用协作轮询方案虽牺牲了整体通信速率，但可在一定程度上提高感知精确度。根据所得的融合方案性能分析，

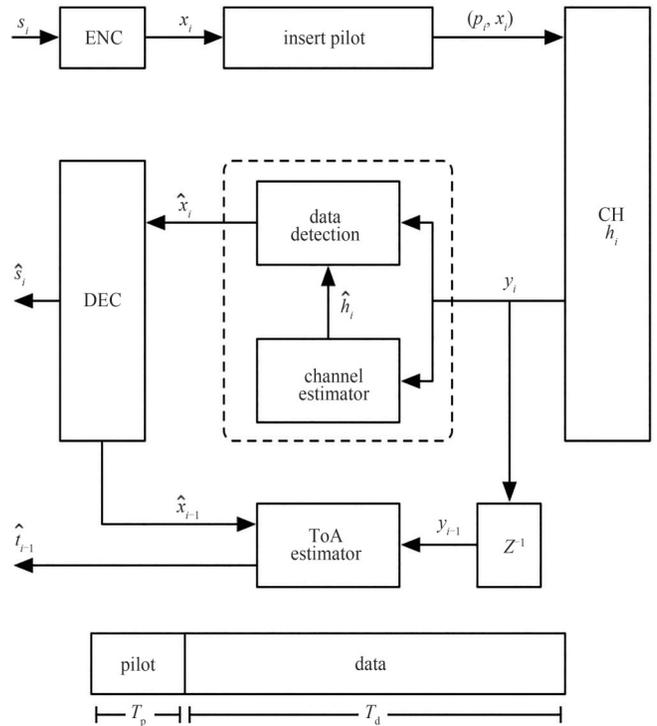


Fig.6 Data-aid ISAC strategy and the frame structure diagram
图 6 数据辅助通感融合技术及帧结构示意图

采用协作轮询方案虽牺牲了整体通信速率，但可在一定程度上提高感知精确度。根据所得的融合方案性能分析，

构建通感可行域。相比于频分方案，时分频分策略忽略了通感信号之间存在信息互助的可能性，降低了系统的联合性能。虽然仿真结果显示时分效率最低，但其简单易实现，对收发装置要求不高，具有较高的实用性。

1.3 通感时频资源优化设计

基于通感性能函数，设计时频资源优化算法，解决自组网集群因通感分立设计导致的综合性能受限问题。

令各节点总功率为 P ，节点 k 当前通信业务速率需求 R_k ，当前设备噪声功率为 σ_k^2 ，可通过香农公式推算节点 k 通信所需功率 $P_k^{(c)}$ ，则感知可用最大功率为 $P_k^{(p)} \leq P - P_k^{(c)}$ ，即可得到当前节点感知误差下届(Squared Position estimation Error Bound, SPEB)为：

$$P(p_k) \triangleq \text{tr} \left\{ \mathbf{J}_e^{-1} \left(p_k; \{x_{kj}\} \right) \right\} \quad (11)$$

式中： p_k 为当前设备位置； x_{kj} 为节点 k 向节点 j 链路发送功率； \mathbf{J}_e 为等效费希尔信息矩阵。

当前设备感知精确度满足 $E \left\{ \left\| \hat{p}_k - p_k \right\|^2 \right\} \geq P(p_k)$ ，其中等效费希尔信息矩阵为：

$$\mathbf{J}_e(p_k; x_{kj}) = \sum_j \xi_{kj} x_{kj} \mathbf{J}_r(\phi_{kj}) \quad (12)$$

式中： ξ_{kj} 为受信道影响的感知因子，多径效应小，非视距影响小，噪声低，则 ξ_{kj} 大； ϕ_{kj} 为节点 j 到节点 k 的角度：

$$\mathbf{J}_r(\phi_{kj}) = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_{kj} & \cos \phi_{kj} \sin \phi_{kj} \\ \cos \phi_{kj} \sin \phi_{kj} & \sin^2 \phi_{kj} \end{bmatrix} \quad (13)$$

时频资源优化问题的目标为给定网络内的各节点功率，达到最小 SPEB 的资源分配策略，优化问题表示为：

$$\begin{cases} \min_{x_{kj}} \sum_k P(p_k) \\ \text{s.t.} \sum_j x_{kj} \leq P_k^{(p)} \\ x_{kj} \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

以上优化问题在集中式设计方案中，中心节点知道全局信息可直接求得最优解。而分布式场景中，各节点

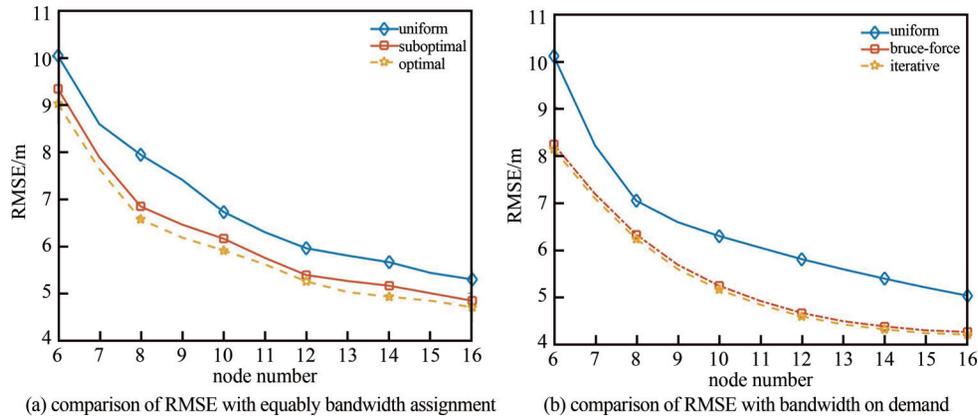


Fig.8 Comparison of RMSE of different strategies in different scenarios

图 8 不同场景下的策略性能对比

只知道局部信息，以上优化问题难以构建全局最优解，因此需引入不确定信息，对优化问题进行松弛，构建轮询算法，实现全局次优解。本文开展仿真实验，首先在所有节点带宽固定情况下(图 8(a))，对比均匀分配方案、全局最优方案以及局部次优方案之间感知精确度。实验表明，局部次优方案与全局最优方案相差较小，均远好于均匀分配方案。然后，在各节点带宽弹性可调情况下(图 8(b))，对比均匀分配算法、所提迭代算法的感知精确

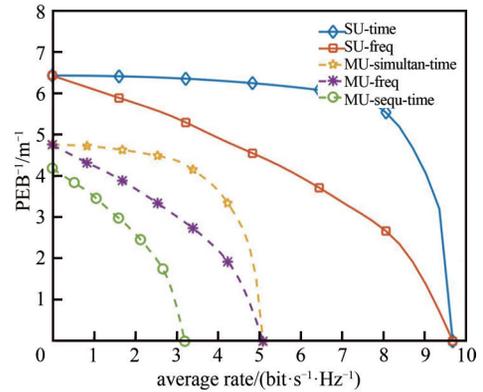


Fig.7 PEB vs. communication rate(time division and frequency division strategies)

图 7 PEB vs. 通信速率(时分频分仿真场景)

度，以及感知精确度的克拉美罗边界。结果表明，相对于均匀分配算法，所提方法可有效提高感知性能，并逼近克拉美罗边界。综上所述，所提方法以通信需求为约束条件，保障实时通信所需时频资源；以剩余资源为边界，通过网络联合资源联合分配策略。仿真结果表明，所提方法在不降低网络通信性能情况下，可大幅提高网络感知性能，有效增强通感网络的可靠性与稳定性。

2 通感一体化软硬件设计及原型系统外场测试

通感一体化软硬件主要用于支持室内等卫星拒止场景下多节点通信感知功能，可为智慧家庭、智慧工厂等场景提供支持服务。通感一体化系统模块包含多传感器算法融合模块、通信感知模块、天线与电源模块。图 9 为通感一体模块硬件(终端节点)示意图。

其中，感知硬件支撑包括：a) 基于多次迭代的钟偏校正：通过节点间多次往返时间测量来校正两节点间的钟偏，提高测距感知精确度；b) 前沿拟合算法：将多次捕获的相关峰前沿进行曲线预测(最小二乘曲线拟合)，预估下次相关峰前沿到达时刻；c) 多传感器算法融合技术：硬件模块可包含多种感知相关的传感器数据，差分北斗模块(具有实时动态(Real-Time Kinematic, RTK)定位能力)、惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、射频感知、高度计和磁罗盘等，基于感知解算核心，采用多级卡尔曼滤波算法，将多传感数据融合处理，提高参数估计精确度，保障平滑精准的感知性能。

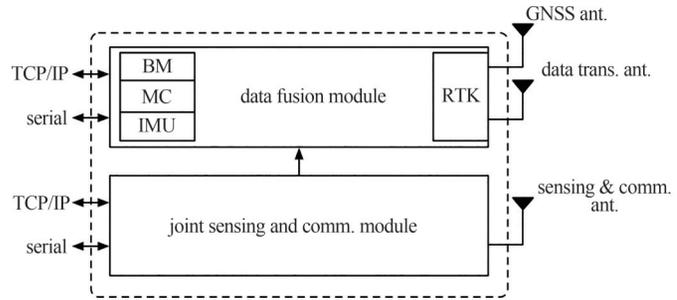


Fig.9 Equipment diagram
图9 设备组成框图

2.1 硬件方案设计

硬件需要支撑通信与感知功能，因此在无线射频硬件选型上需要满足以下功能需求：高速高精度 AD/DA 采样功能；高性能 FPGA 信号处理及 Zynq 协议处理功能；中频自环功能；支持以太网口、串口业务数据收发功能；程序存储与在线加载功能；电源保护功能；模拟通道需要安装屏蔽罩以提升收发隔离。

通信射频模块主要由基带单元、射频单元、时钟单元、供电单元等组成。本设计采用 Xilinx 的 Zynq-7100 系列芯片，内置 Cortex-A9 的双核 ARM 应用处理器，用于通感一体化模块通信感知波形，以及时频复用算法、复杂环境下的抗多径与非视距感知算法和时变场景自学习多元信息融合算法的实现。射频单元主要采用射频收发器芯片 AD9371。上行信道：射频收发芯片将基带数字信号进行 D/A 转换后，变频至通感一体化模块工作频率；经过放大器滤波后，输出至射频收发开关并进行发射切换；最后经过天线发射出去。下行信道：处理流程和上行处理流程相反，射频子系统通过天线接收下行空口信号，射频开关器完成接收信号的切换；经过低噪放大后，进入收滤波器，抑制带外杂散干扰，然后进入射频收发芯片。

2.2 软件方案设计

软件包括通感信号波形物理层设计、点对点感知方案设计以及组网协议设计。

1) 通感波形设计及物理层实现方案

本方案设计探测请求帧及应答帧 2 种帧类型，帧长均为 5 ms，其中 I 路为全导频，用于频偏估计；Q 路前 640 个符号为前导序列，用于捕获、到达时间精确估计和粗时钟同步。Q 路数据段要进行循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)和卷积编码，符号速率为 320 ksps。帧结构如图 10 所示。

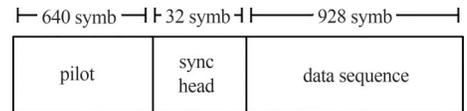


Fig.10 Frame structure diagram
图 10 帧结构示意图

2) 点对点感知方案设计

发射端信号处理流程如图 11 所示，对来自上层的信息待发送码元进行编码，对编码后的数据进行 CRC 校验添加校验码，按照帧结构对编码数据、校验码与前导进行物理信道复接，对复接后的码片信号进行差分编码，差分编码后的数据进行直接序列扩谱，扩频后的信号进行根升余弦的成型滤波形成基带输出信号。

接收信号经 AD9371 采样后，进入波形匹配滤波器，降采样到 2 倍码片速率。若采用开环模式，则将降采样后的 2 倍码片速率数据经码匹配滤波器后，进行差分解调，然后进行帧头检测，帧同步头匹配出相关峰后在上层进行前沿曲线拟合，用于在感知消息中准确感知采集序列的前沿，进一步提高网络到达时间(Time Of Arrival,

TOA)估计的精确度。采用闭环模式，降采样后数据经码匹配滤波器后进行16次累计相关峰平滑，当Acq超过阈值，则输出指示信号到码环跟踪器，通过调整码相位获取码片对齐的精确位置，可获取更高精确度的相关峰到达时间，降低时间模糊造成的估计误差，达到提高感知精确度的目的。接收机信号闭环捕获模式处理流程示意图如图12所示。

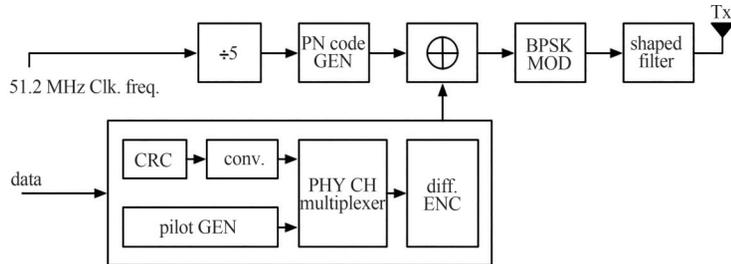


Fig.11 Signal generation at transmitter
图11 发射端信号生成

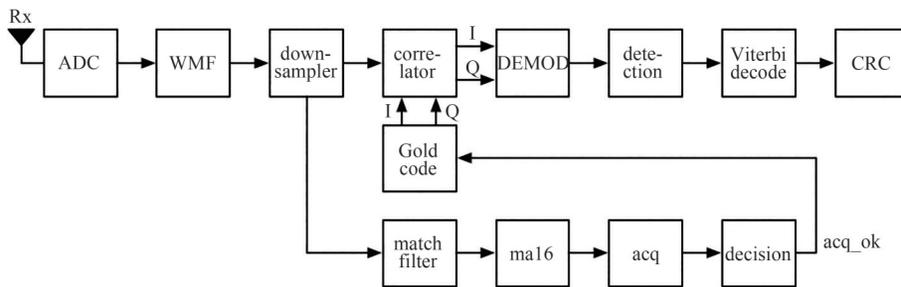


Fig.12 Closed-loop signal capture at receiver
图12 接收机信号闭环捕获模式处理流程

3) 组网协同感知协议设计

每节点时隙 5 ms，共 10 个节点，节点 1 首先发起感知请求，通感信号及高速通信业务均可支持，其他节点收到 1 的感知请求后，将时间粗同步到 1 节点，并计算出本节点与节点 1 间的频偏。节点 2 收到节点 1 感知请求后，立即回复感知应答帧，节点 3 将频偏补偿计算 5 ms 后回复感知应答帧，其他节点依次在各自时隙回复感知应答帧。由此节点 1 将获取与其他网内各节点间的距离，并能获取有绝对位置节点的位置信息。

50 ms 后，节点 2 发起感知请求，其他各节点将时间粗同步到节点 2，并计算本节点与节点 2 间的频偏。节点 1 收到节点 2 的感知请求后，立即回复感知帧，节点 3 则计时 5 ms 后回复，其他节点依次在各自时隙回复感知帧。由此节点 2 将获取与其他网内各节点间的距离，并能获取有绝对位置节点的位置信息。

依此顺序，如图 13 所示，10 个节点 500 ms 后，所有节点均将获取与网内其他节点间的距离和有绝对位置节点的位置信息，并据此得到网内各节点的位置拓扑。

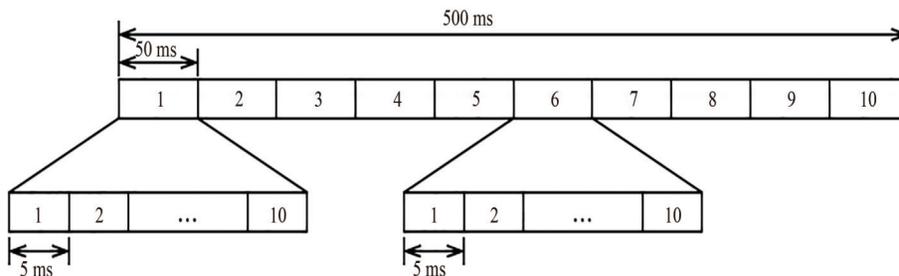


Fig.13 Time slot of networking protocol
图13 节点组网时隙图(示例)

2.3 通感融合样机研制及测试

基于设计方案，研制搭建通感一体化原型测试样机，如图 14 所示，包含通信感知板卡及多传感器算法融合板卡。通信感知板卡为波形基带算法运行平台，波形基带算法在 FPGA 中实现，AD/DA 由 AD9371 实现；接收状态下，系统将射频信号依次进行混频、滤波、放大、ADC、解调；发送状态下，系统将数据进行调制、DAC、

滤波、放大。多传感器算法融合板卡基于卡尔曼滤波器，融合多源信息数据，保障稳定、无缝的全域高精度感知定位服务，实现各种复杂场景下位置的平滑输出。

研制模块在外场开展了多次通信感知性能测试，通信速率 320 kbps，在 2 km 内外场空旷环境下，丢包率 $\leq 0.05\%$ 。测距感知结果如图 15 所示：真实间距 135.67m，平均测距结果在 138.63 m 左右，均方根误差为 2.97 m；真实间距 2 215.38 m，平均测距结果为 2 224.46 m，均方根误差为 9.14 m。

3 结论

本文设计了一套包含通感信号融合设计、时频资源联合优化方案的自组网通信感知系统框架，研制并搭建通感融合模组验证平台，在外场测试中证明了所提方法可在 2 km 内利用通信信号实现感知精确度优于 10 m，通信速率高于 320 kbps，丢包率不超过 0.05%。从理论分析与测试验证分析来看，通感信号融合处理还有更大的潜力空间挖掘，软硬件还有更大的优化空间。



Fig.14 Prototype of ISAC module
图 14 通感融合模块原型样机

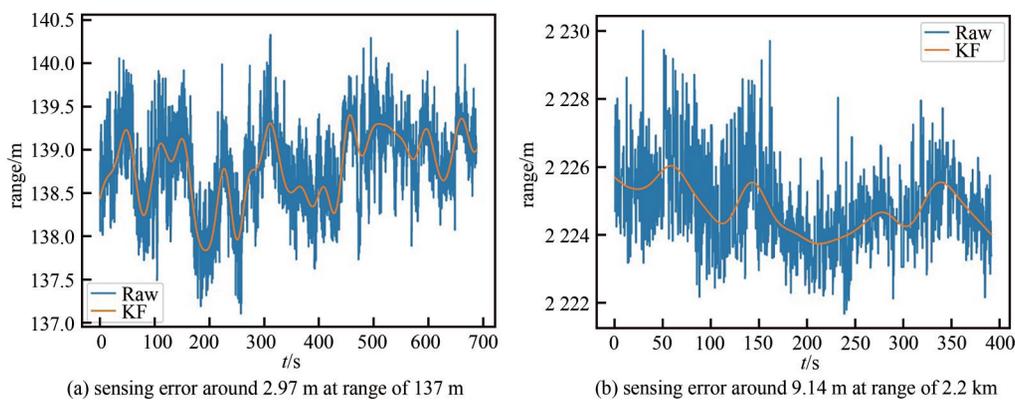


Fig.15 Field experiment results
图 15 外场测试结果

参考文献：

- [1] 谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2009. (XIE Gang. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing:Electronics Industry Publishing House, 2009.)
- [2] XIAO Z,ZENG Y. An overview on integrated localization and communication towards 6G[J/OL]. arXiv:2006.01535, 2020.
- [3] LEYVA L,CASTANHEIRA D,SILVA A,et al. Cooperative multiterminal radar and communication:a new paradigm for 6G mobile networks[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021,16(4):38–47.
- [4] LIYANAARACHCHI S D,RIIHONEN T,BARNETO C,et al. Optimized waveforms for 5G–6G communication with sensing: theory,simulations and experiments[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021,20(12):8301–8315.
- [5] 尉志青,冯志勇,李怡恒,等. 太赫兹通信感知一体化波形:现状与展望[J]. 通信学报, 2022(1):3–10. (WEI Zhiqing,FENG Zhiyong, LI Yiheng, et al. Terahertz joint communication and sensing waveform: status and prospect[J]. Journal on Communications, 2022(1):3–10.)
- [6] 闫实,彭木根,王文博. 通信-感知-计算融合:6G愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021,44(4):1–11. (YAN Shi,PENG Mugen,WANG Wenbo. Integration of communication,sensing and computing:the vision and key technologies of 6G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021,44(4):1–11.)
- [7] Defense Advanced Research Projects Agency. Shared spectrum access for radar and communications(SSPARC)[EB/OL]. (2013–09–19). <https://www.federalgrantswire.com/shared-spectrum-access-for-radarand-communications-ssparc-darpa-baa-13-24.html#.X40Vavk6s7M>, 2013.
- [8] MT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告[R], 2021. (IMT-2030(6G) Promotion Group. Research report on integrated sensing and communication[R]. 2021.)
- [9] ZHANG J A,RAHMAN M L,WU K,et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022,24(1):306–345.

- [10] LIU F, MASOUIROS C, PETROPULUET A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(6):3834–3862.
- [11] CHIRIYATH A R, PAUL B, JACYNA G M, et al. Inner bounds on performance of radar and communications co-existence[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(2):464–474.
- [12] LIU Y, LIAO G, XU J, et al. Adaptive OFDM integrated radar and communications waveform design based on information theory[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(10):2174–2177.
- [13] KUMARI P, VOROBYOV S A, HEATH R W, et al. Adaptive virtual waveform design for millimeter-wave joint communication-radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68(1):715–730.
- [14] MEALEY R M. A method for calculating error probabilities in a radar communication system[J]. IEEE Transactions on Space Electronics and Telemetry, 1963, 9(2):37–42.
- [15] SADDIK G N, SINGH R S, BROWN E R. Ultra-wideband multifunctional communications/radar system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2007, 55(7):1431–1437.
- [16] JAMIL M, ZEPERNICK J M, PETERSSON M I. On integrated radar and communication systems using Oppermann sequences[C]// Military Communications Conference. San Diego, CA: IEEE, 2008.
- [17] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y, et al. Non-coherent PSK-based dual-function radar-communication systems[C]// 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf). Philadelphia, PA: IEEE, 2016:16–21.
- [18] BOUDAHER E, HASSANIEN A, ABOUTANIOS E, et al. Towards a dual-function MIMO radar-communication system[C]// 2016 IEEE Radar Conference. Philadelphia, PA: IEEE, 2016:1310–1315.
- [19] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Dual-function radar-communications: information embedding using sidelobe control and waveform diversity[J]. IEEE Transactions Signal Processing, 2016, 64(8):2168–2181.
- [20] LIU F, MASOUIROS C, LI A, et al. MUMIMO communications with MIMO radar: from co-existence to joint transmission[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4):2755–2770.
- [21] GAUDIO L, KOBAYASHI M, CAIRE G, et al. On the effectiveness of OTFS for joint radar parameter estimation and communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(9):5951–5965.
- [22] WYMEERSCH H, LIEN J, WIN M Z, et al. Cooperative localization in wireless networks[J]. Proceedings of IEEE, 2009, 97(2):427–450.
- [23] SHEN Y, WYMEERSCH H, WIN M Z, et al. Fundamental limits of wideband localization—part II: cooperative networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(10):4981–5000.
- [24] TAO Xiaofeng, XU Xiaodong, CUI Qimei. An overview of cooperative communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(6):65–71.
- [25] SHENG Z, LEUNG K K, DING Z G, et al. Cooperative wireless networks: from radio to network protocol designs[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(5):64–69.
- [26] 王龙, 冯玉强, 黄福玉. 基于Agent的协同感知控制体系与通信机制[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 33(2):183–187. (WANG Long, FENG Yuqiang, HUANG Fuyu. Agent-based collaboration awareness control system and communication mechanism[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science), 2009, 33(2):183–187.)
- [27] SDOKHANCHI S H, MYSORE B S, MISHRA K V, et al. A mmwave automotive joint radar-communications system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(3):1241–1260.
- [28] ZHANG J A, HUANG X J, GUO Y J, et al. Multibeam for joint communication and radar sensing using steerable analog antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1):671–685.
- [29] WANG Y, WU Ying, SHEN Y. Cooperative tracking by multi-agent systems using signals of opportunity[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(1):93–105.

作者简介:

沈 渊(1982-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为统计推断、通信与信息论、协同感知理论及算法. email: shen_ee@tsinghua.edu.cn.

胡可可(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为信号处理、通感信号融合处理.

孙 铭(1987-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为无线通信.

韩 东(1996-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为通信工程、无线通信技术.

申 啸(1997-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为信息论、信息动力学、通感融合理论.