

毫米波雷达通信一体化大规模阵列天线混合波束形成

余苗, 余小游, 曾胜艳, 杨琦

湖南大学信息科学与技术学院, 湖南 长沙

Email: yumiao96@hnu.edu.cn, yuxiaoyou@hnu.edu.cn, zengshengyan@hnu.edu.cn, yangyangqi@hnu.edu.cn

收稿日期: 2021年5月16日; 录用日期: 2021年6月16日; 发布日期: 2021年6月25日

摘要

本文研究毫米波车载雷达通信一体化系统中大规模阵列天线混合波束形成的优化设计问题。考虑的设计自由度包括源车辆发射端处的混合波束形成器、源车辆接收端处的雷达接收滤波器和接收车辆接收端处的通信基带合成器。本文提出一种最小化均方误差(MMSE)准则下的混合波束形成优化设计方法, 在兼顾发射端模拟波束形成器单位模约束、发射端发射功率、通信数字波束、雷达最佳波束、雷达接收端信噪比(SINR)等约束条件的前提下, 将涉及多约束变量的非凸优化问题分解为四个子问题后, 采用交替迭代优化机制(AIOM)求解混合波束形成问题。仿真实验表明, AIOM求解得到的大规模阵列天线混合波束形成, 既有良好的收敛性, 又有良好的通信与雷达折衷性能。

关键词

毫米波, 大规模阵列天线, 混合波束形成, 雷达通信一体化, 交替迭代优化机制

Hybrid Beamforming of Millimeter Wave Radar Communication Integrated with Large Scale Array Antenna

Miao Yu, Xiaoyou Yu, Shengyan Zeng, Qi Yang

College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha Hunan

Email: yumiao96@hnu.edu.cn, yuxiaoyou@hnu.edu.cn, zengshengyan@hnu.edu.cn, yangyangqi@hnu.edu.cn

Received: May 16th, 2021; accepted: Jun. 16th, 2021; published: Jun. 25th, 2021

文章引用: 余苗, 余小游, 曾胜艳, 杨琦. 毫米波雷达通信一体化大规模阵列天线混合波束形成[J]. 天线学报, 2021, 10(2): 14-19. DOI: 10.12677/ja.2021.102003

Abstract

This paper studies the design of hybrid beamforming (HBF) for large-scale array antenna in millimeter wave vehicle radar and communication integration system. The design freedom includes the HBF at the transmitter of the source vehicle, the radar filter at the receiver of the source vehicle and the communication baseband combiner at the receiver of the recipient vehicle. In this paper, a HBF optimization design method based on the minimum mean square error (MMSE) criterion is proposed, which takes into account the unit mode constraint of the transmitter analog beamformer, the transmit power constraint, the communication digital beampattern, the optimal radar beampattern and the signal to interference noise ratio (SINR) of the radar receiver. After decomposing the non-convex optimization problem with multiple variables into four subproblems, the alternating iterative optimization mechanism (AIOM) is used to solve the optimization problem. Simulation results show that the HBF of large-scale array antenna obtained by AIOM has good convergence and good tradeoff performance between communication and radar.

Keywords

Millimeter Wave, Large-Scale Array Antennas, Hybrid Beamforming, Radar and Communication Integration, Alternating Iterative Optimization Mechanism

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

毫米波(mmWave)频段的雷达通信一体化系统已经成为下一代车辆通信中的一个有吸引力的方案[1]。一方面,毫米波通信支持车辆间 Gbps 级的数据交换[2]。另一方面,毫米波雷达支持超高精度的目标感知[3]。混合波束形成方案是适用于毫米波系统的方案[4],因为它既能利用大规模天线阵列下模拟波束形成的高波束形成增益,又能基于极少量射频(RF)链利用数字波束形成器进行多数据流处理[5]。

本文研究了毫米波雷达通信一体化系统中的混合波束形成设计,联合设计的对象是混合波束形成器、雷达接收滤波器和通信接收组合器,通过设定标准雷达 SINR 值,提出以通信最小化 MSE(MMSE)为目标的优化问题,其约束条件为:1) 保证一定的雷达 SINR;2) 满足发射功率限制;3) 满足混合波束形成中模拟波束形成器的常数模约束。约束条件使得优化问题是非凸的,可以将其分解为对应于不同变量的四个子问题并通过交替优化机制求解:算法每次迭代涉及一个凸问题、一个非凸问题和两个分式规划问题。仿真结果表明了该方案的有效性,能够实现雷达性能和通信性能的折衷。毫米波大规模天线系统中混合波束形成框架如图 1 所示。

2. 系统模型

2.1. 传输信号模型

考虑均匀线性阵列,在发射端,混合波束形成包含了维度为 $N_{\text{RF}} \times N_s$ 的数字波束形成器 \mathbf{F}_{BB} 和一个维度为 $N_{\text{TX}} \times N_{\text{RF}}$ 的模拟波束形成器 \mathbf{F}_{RF} ,其中 N_{RF} 为射频链数目, N_s 为传输数据流数目。 \mathbf{F}_{RF} 是用相移器实现的,其非零元素需要满足单位模约束,即 $[\mathbf{F}_{\text{RF}}]_{ij=1}$ 。归一化功率约束为 $\|\mathbf{F}_{\text{RF}}\mathbf{F}_{\text{BB}}\|_F^2 = N_s$ 。假定在相干

处理时间(CPI)内, 通信和雷达目标车辆的距离, 方向和速度相对于源车辆来说保持不变。源车辆发出的传输信号为 $\mathbf{x} = \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}} \mathbf{s}$ 。

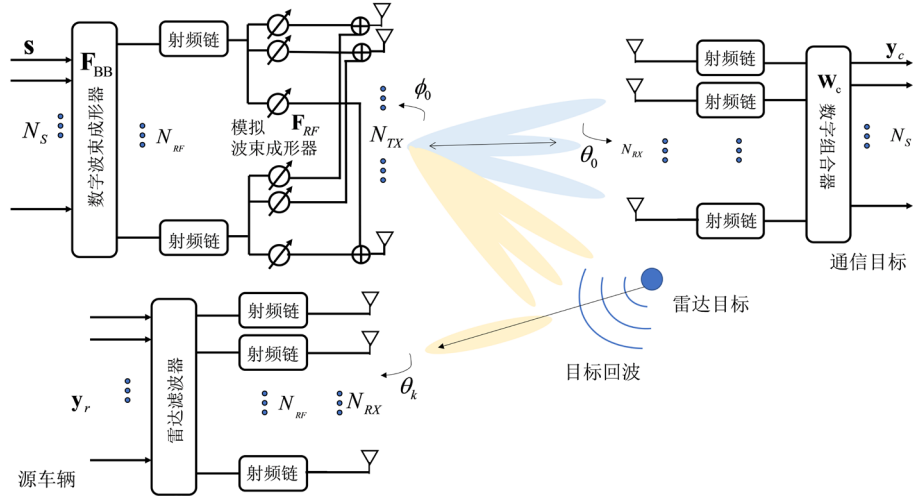


Figure 1. Hybrid beamforming framework for millimeter-wave large-scale antenna systems
图 1. 毫米波大规模天线系统中混合波束形成框架

2.2. 接收信号模型

1) 通信接收信号模型: 考虑毫米波信道模型[5]: $\mathbf{H}_c = \alpha \mathbf{a}_{\text{RX}}(\theta_0) \mathbf{a}_{\text{TX}}^*(\phi_0) \in \mathbb{C}^{N_{\text{RX}} \times N_{\text{TX}}}$, 其中, α 是复信道增益; $\mathbf{a}_{\text{TX}}(\phi_0) / \mathbf{a}_{\text{RX}}(\theta_0)$ 表示发射/接收天线阵列导向矢量。接收信号经过基带组合器 \mathbf{W}_c 后表示为:

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{W}_c^* \mathbf{H}_c \mathbf{x} + \mathbf{W}_c^* \mathbf{z}_c = \mathbf{W}_c^* \mathbf{H}_c \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}} \mathbf{s} + \mathbf{W}_c^* \mathbf{z}_c \quad (1)$$

$\mathbf{z}_c \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_c^2 \mathbf{I}_{N_{\text{RX}}})$ 是复加性高斯噪声。因此, 接收信号与发射信号之间的均方误差定义为:

$$\text{MSE} = \mathbb{E} \left[(\mathbf{s} - \mathbf{y}_c)(\mathbf{s} - \mathbf{y}_c)^* \right] \quad (2)$$

2) 雷达接收信号模型: 假定 K_r 个目标车辆和 $K - K_r$ 个多路径散射分量。关于雷达目标的 LoS 路径的毫米波信道系数矩阵为 $\mathbf{H}_r = \sum_{k=0}^{K_r-1} \sqrt{\beta_k} \mathbf{a}_{\text{RX}}(\theta_k) \mathbf{a}_{\text{TX}}^*(\phi_k)$, 其中 β_k 表示复信道增益。对于远场雷达回波而言, 离开角和达到角是相同的, 即, $\phi_k = \theta_k$ 。散射体可以视为杂波噪声。源车辆接收到的信号回波经过雷达接收接收滤波器 \mathbf{W}_r 之后可以表示为[6]:

$$\mathbf{y}_r[k] = \mathbf{W}_r^* \mathbf{H}_r \mathbf{x}[k] + \mathbf{W}_r^* \mathbf{z}_{\text{cl}} + \mathbf{W}_r^* \mathbf{z}_n = \mathbf{W}_r^* \mathbf{H}_r \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}} \mathbf{s}[k] + \mathbf{W}_r^* \mathbf{z}_{\text{cl}} + \mathbf{W}_r^* \mathbf{z}_n, \quad (3)$$

其中, 的维度为 $N_{\text{RX}} \times \mathbf{I}_{N_s}$, \mathbf{z}_n 是复加性高斯噪声, 满足 $\mathcal{CN}(0, \sigma_c^2 \mathbf{I}_{N_{\text{RX}}})$ 分布。 \mathbf{H}_{cl} 假设是一个复高斯随机过程。源车辆接收到的雷达信号的信噪比为:

$$\zeta_{\text{rad}} = \mathcal{E}_s \left| \mathbf{W}_r^* \mathbf{H}_r \mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}} \right|^2 / \left(\sigma_{\text{cl}}^2 + \sigma_n^2 \right) \mathbf{W}_r^* \mathbf{W}_r \quad (4)$$

3. 混合波束形成设计

雷达通信一体化系统中, 关于四个变量的联合优化问题可以表述为:

$$\mathcal{P} \begin{cases} \min_{\mathbf{W}_c, \mathbf{F}_{\text{RF}}, \mathbf{F}_{\text{BB}}, \mathbf{W}} \text{MSE} \\ \text{s.t.} : \zeta_{\text{rad}} \geq \text{SINR}_0, \mathbf{F}_{\text{RF}} \in \mathcal{F}_{\text{RF}}, \|\mathbf{F}_{\text{RF}} \mathbf{F}_{\text{BB}}\|_F^2 = N_s \end{cases} \quad (5)$$

这个问题是非凸的，可以将初始优化问题分解为四个最小化子问题 $\mathcal{P}_{\mathbf{W}_c}$, $\mathcal{P}_{\mathbf{W}_r}$, $\mathcal{P}_{\mathbf{F}_{BB}}$ and $\mathcal{P}_{\mathbf{F}_{RF}}$ 并给出了各自具体的解决方案。最后通过 AIOM 迭代四个求解步骤直到达到收敛条件。

3.1. 关于 \mathbf{W}_c 的子问题及其求解方法

给定 \mathbf{F}_{RF} , \mathbf{F}_{BB} , \mathbf{W}_r 。关于 \mathbf{W}_c 的优化子问题和其解分别为：

$$\mathcal{P}_{\mathbf{W}_c} : \min_{\mathbf{W}_c} \text{MSE} \quad (6)$$

$$\mathbf{W}_c = \left[\mathbf{H}_c \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{F}_{BB}^* \mathbf{F}_{RF}^* \mathbf{H}_c^* + \sigma_c^2 \mathbf{I}_{N_{RX}} \right]^{-1} \mathbf{H}_c \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \quad (7)$$

3.2. 关于 \mathbf{W}_r 的子问题及其求解方法

\mathbf{W}_r 仅仅和雷达 SINR 约束相关，其最小方差无失真响应(MVDR)问题[7]和其闭式解为：

$$\mathcal{P}_{\mathbf{W}_r} : \max_{\mathbf{W}_r} \zeta_{\text{rad}} \quad (8)$$

$$\mathbf{W}_r = \left[(\sigma_{cl}^2 + \sigma_n^2) \mathbf{I}_{N_{RX}} \right]^{-1} (\mathbf{H}_r \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}) / \left[(\mathbf{H}_r \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB})^* \left[(\sigma_{cl}^2 + \sigma_n^2) \mathbf{I}_{N_{RX}} \right]^{-1} (\mathbf{H}_r \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}) \right] \quad (9)$$

3.3. 关于 \mathbf{F}_{BB} 的子问题及其求解方法

类似的，关于 \mathbf{F}_{BB} 的优化问题可以表示为：

$$\mathcal{P}_{\mathbf{F}_{BB}} \begin{cases} \min_{\mathbf{F}_{BB}} \text{MSE} \\ \text{s.t.} : \zeta_{\text{rad}} \geq \text{SINR}_0, \|\mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}\|_F^2 = N_S \end{cases} \quad (10)$$

通过拉格朗日对偶算法可以求其解为：

$$\mathbf{F}_{BB}^*(\lambda) = \left[\mathbf{F}_{RF}^* \mathbf{H}_c^* \mathbf{W}_c \mathbf{W}_c^* \mathbf{H}_c \mathbf{F}_{RF} - \frac{\lambda \mathcal{E}_s (\mathbf{F}_{RF}^* \mathbf{H}_r^* \mathbf{W}_r \mathbf{W}_r^* \mathbf{H}_r \mathbf{F}_{RF})}{(\sigma_{cl}^2 + \sigma_n^2) \mathbf{W}_r^* \mathbf{W}_r} \right]^{-1} \mathbf{F}_{RF}^* \mathbf{H}_c^* \mathbf{W}_c \quad (11)$$

3.4. 关于 \mathbf{F}_{RF} 的子问题及其求解方法

令 c_1 , c_2 为关于通信和雷达的惩罚程度，关于 \mathbf{F}_{RF} 的子问题可以表示为：

$$\mathcal{P}_{\mathbf{F}_{RF}} \begin{cases} \min_{\mathbf{F}_{RF}} \text{MSE} \\ \text{s.t.} : \zeta_{\text{rad}} \geq \text{SINR}_0, \mathbf{F}_{RF} \in \mathcal{F}_{RF}, \|\mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}\|_F^2 = N_S \end{cases} \quad (12)$$

将雷达的 SINR 约束作为惩罚项合并到目标函数中可以通过黎曼共轭梯度(RCG)算法求解[7]。

3.5. 四个变量的联合设计

四个变量联合设计的整体交替迭代优化中，每个变量都是子问题的最优解，因此， $\text{MSE}^{(n+1)} \leq \text{MSE}^{(n)}$ ；再者，即 \mathcal{P} 的目标函数是有下界的。根据单调收敛理论[8]，目标函数将最终收敛到一个最值。最后，令 $\mathbf{F}_{BB} = N_S \mathbf{F}_{BB} / \|\mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}\|_F$ 来满足功率约束。

4. 仿真实验

仿真中，通信噪声方差、雷达噪声方差和通信信噪比满足 $\sigma_c^2 = \sigma_n^2 = \sigma_{cl}^2 = \varepsilon_s / \text{SNR}$ 。图 2(a)证明了 AIOM 的收敛性。同时，基于混合波束形成的雷达通信一体化系统的通信 MSE 也随着 N_{TX} 的增加而减小。令， $c = c_1/c_2$ ，在图 2(b)中，我们比较了混合波束形成器与无约束数字波束形成器的性能。增加 SINR_0 的值降低了通信速率，且通信速率在较大的 c 值下表现更好。摆脱雷达约束时，混合波束形成方法可以接

近全数字情况。图 3(b)示出了在固定通信 SNR = 10 dB 和雷达参考 SINR₀ = 0 dB 的情况下, 雷达输出 SINR 性能与通信速率的关系。可以看出, 该方法实现了通信性能和雷达性能之间的折衷。

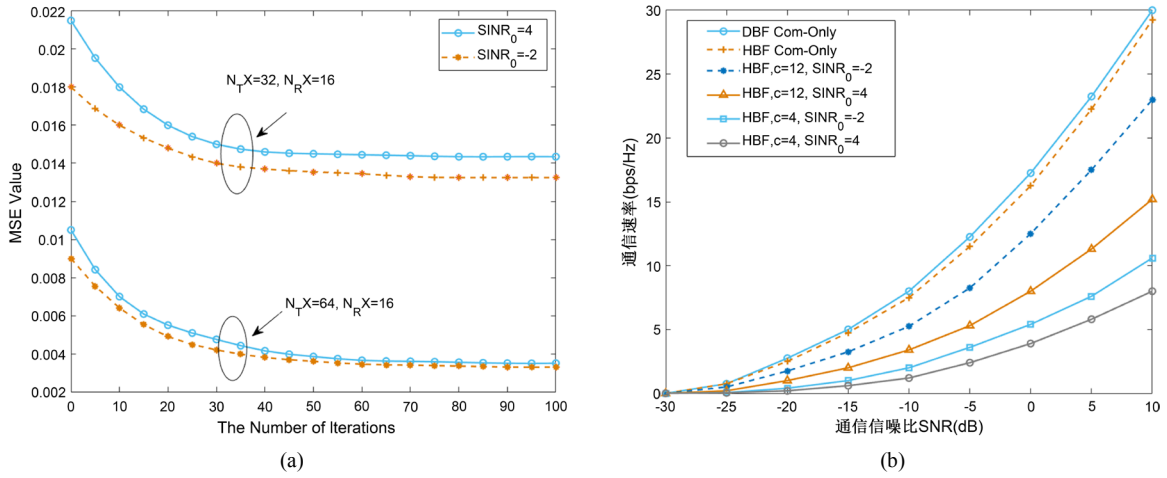


Figure 2. (a) Convergence of AIOM; (b) The realizable rate of vehicle communication under different radar constraints ($N_{TX} = 64, N_{RX} = 16$)

图 2. (a) AIOM 收敛性; (b) 不同雷达约束条件下车辆通信的可实现速率 ($N_{TX} = 64, N_{RX} = 16$)

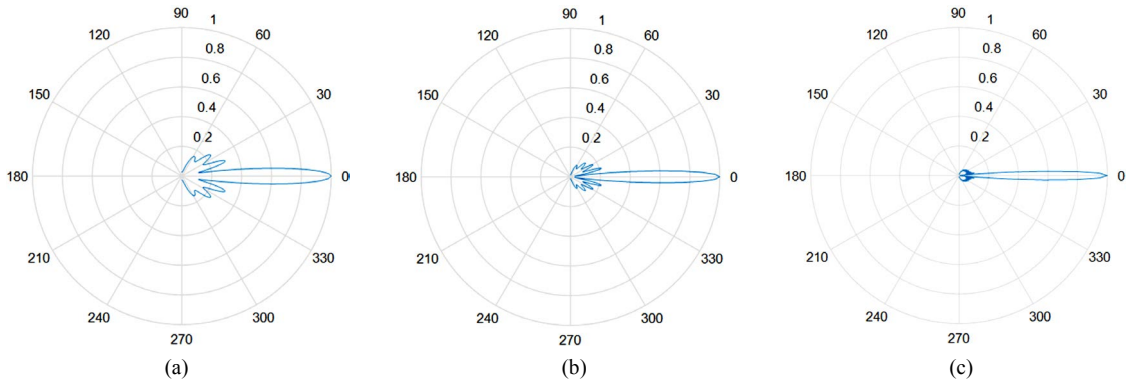


Figure 3. A single beam formed by a hybrid beam. (a) $N_{TX} = 16$; (b) $N_{TX} = 32$; (c) $N_{TX} = 64$

图 3. 混合波束形成的单波束。(a) $N_{TX} = 16$; (b) $N_{TX} = 32$; (c) $N_{TX} = 64$

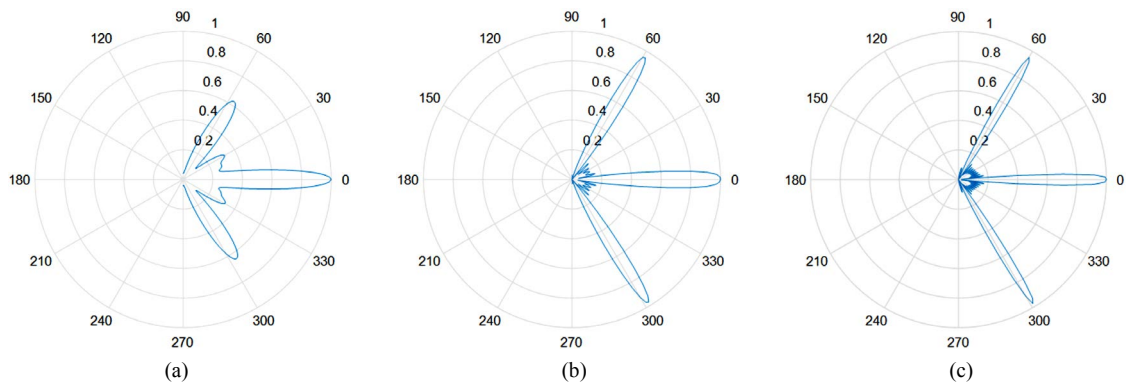


Figure 4. Hybrid beamforming multibeam. (a) $N_{TX} = 16$; (b) $N_{TX} = 32$; (c) $N_{TX} = 64$

图 4. 混合波束形成的单波束。(a) $N_{TX} = 16$; (b) $N_{TX} = 32$; (c) $N_{TX} = 64$

图3表示考虑通信 LoS 时波束生成情况, 其中, 将离开角设置为 $\phi_0 = 0^\circ$, 从图中可以得知, 随着天线数目的增加, 旁瓣能够显著降低, 并且波束随着天线数目的增加而变窄, 这有利于抑制干扰。图4表示了生成的多波束, 其中3个角度分别为 $-60^\circ, 0^\circ, 60^\circ$, 通信目标保持 0° 不变, 但是通信目标同时也是雷达探测目标。所以在 0° 是, 波束增益是最大的。另外, 随着天线数目的增加, 波束增益增加, 波束变窄, 旁瓣也得到有效抑制。

5. 结论

本文考虑了车联网环境中的毫米波雷达通信一体化系统, 涉及通信接收组合器、雷达接收滤波器和发射混合波束形成的联合设计。该问题的目的是在满足雷达接收机 SINR 约束和功率约束的情况下, 最小化车辆通信链路的路径损耗。针对这一问题, 我们将初始问题分解成四个子优化问题, 采用拉格朗日对偶方法和黎曼共轭梯度算法来获得混合波束形成器的解; 并求的通信接收组合器、雷达接收滤波器各自的闭式解; 最后通过交替迭代优化机制求得初始问题的有效解。我们通过仿真结果对所提出方法的有效性进行了评价。结果表明, AIOM 具有较好的收敛性, 能实现雷达探测和车辆通信的功能并能取得良好的性能折衷。

参考文献

- [1] Liu, F., Masouros, C., Petropulu, A.P., *et al.* (2020) Joint Radar and Communication Design: Applications, State-of-the-Art, and the Road Ahead. *IEEE Transactions on Communications*, **68**, 3834-3862.
- [2] Guizani, Z. and Hamdi, N. (2016) mmWave E-Band D2D Communications for 5G-Underlay Networks: Effect of Power Allocation on D2D and Cellular Users Throughputs. 2016 *IEEE Symposium on Computers and Communication*, Messina, 27-30 June 2016, 114-118. <https://doi.org/10.1109/ISCC.2016.7543724>
- [3] Chen, Z.M., Cao, Z.X., *et al.* (2018) DoA and DoD Estimation and Hybrid Beamforming for Radar-Aided mmWave MIMO Vehicular Communication Systems. *Electronics*, **7**, 40. <https://doi.org/10.3390/electronics7030040>
- [4] Sohrabi, F. and Wei, Y. (2016) Hybrid Digital and Analog Beamforming Design for Large-Scale Antenna Arrays. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, **10**, 501-513. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2520912>
- [5] Sohail, P., Mysore, B.N., Christos, M., *et al.* (2018) Phase Shifters vs Switches: An Energy Efficiency Perspective on Hybrid Beamforming. *IEEE Wireless Communications Letters*, **8**, 13-16.
- [6] Qian, J., Lops, M., Zheng, L., *et al.* (2018) Joint System Design for Coexistence of MIMO Radar and MIMO Communication. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **66**, 3504-3519. <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2831624>
- [7] Liu, F., Masouros, C., Li, A., *et al.* (2019) MU-MIMO Communications with MIMO Radar: From Co-Existence to Joint Transmission. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **17**, 2755-2770. <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2803045>
- [8] Seel, T., Schauer, T. and Raisch, J. (2017) Monotonic Convergence of Iterative Learning Control Systems with Variable Pass Length. *International Journal of Control*, **90**, 393-406. <https://doi.org/10.1080/00207179.2016.1183172>