

强耦合干扰对消系统接收通道噪声系数分析*

李 毅 何方敏 李 阳 孟 进
(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室,武汉 430033)

摘 要: 在一般无源干扰对消方法的基础上,提出了用于抑制强耦合干扰的改进无源对消方法。该方法通过改变接收通道对消耦合器接法实现。推导了对消系统接收通道的噪声系数公式,计算了典型通道数下改进无源方法和有源方法的对消系统接收通道噪声系数;建立了单通道对消系统实验平台,测试了改进无源方法和有源方法的对消系统接收通道噪声系数。结果表明:不同对消通道增益裕量时,最优的改进无源方法相对有源方法的噪声系数均有较大改善,改善量接近放大器的噪声系数;在固定耦合器耦合度情况下,改进无源方法的噪声系数改善量降低,但在实际工程条件下仍优于有源对消方法的噪声系数。

关键词: 干扰对消,强耦合,耦合器,噪声系数

Analysis of Noise Figure of Strong Coupling Interference Cancellation System Receiving Channel

LI Yi, HE Fang-min, LI Yang, MENG Jin
(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Based on the general passive interference cancellation method, an improved passive cancellation method is proposed to suppress the strong coupling interference. The method is realized by changing the receiving channel cancellation coupler connection method. The noise figure(NF) formulas of the receiving channel of the interference cancellation system (ICS) are derived, and noise figures of the receiving channel of ICS with improved passive method and active method under typical channel number are calculated. The experimental platform of a single channel cancellation system is established. Noise figures of improved passive method and active method to the receiving channel are tested. The results show that the NF of the optimal improved passive method is much better than that of the active method when the gain margin of the cancelling channel is different, and the improvement is close to the NF of the amplifier. Under the fixed coupler coupling degree, the NF improvement of the improved passive method is reduced, but it is still better than the NF of the active cancellation method in practical engineering conditions.

Key words: interference cancellation, strong coupling, coupler, noise figure

引 言

在拥挤平台上存在多部发射机和收信机时,由于平台空间有限,收发信机的天线相距近,使收发天线间耦合很强。若收发信机同时工作,发射机将严重干扰收信机的接收。一般无源干扰对消技术^[1-4]是解决共平台干扰的有效手段,但当收发天线耦合较强时,采用一般无源干扰对消技术,需要提取较大

的发射功率作为参考信号,会面临两方面的问题:一是发射功率损耗大,严重影响发射信号的传播距离,二是对消系统处理大功率参考信号,需要大幅提升矢量调制器功率等级。因此,这种对消技术的应用受限。为解决强耦合干扰问题,可在一般无源干扰对消技术基础上,在对消通道上放大参考功率(有源方法),或者在接收通道上衰减干扰信号(无源方法),使在对消耦合器中的参考信号不小于干扰信

* 收稿日期:2021-11-26;修回日期:2022-02-15
基金项目:国家自然科学基金(62001497)

号,从而使对消系统可以实现对消功能。有源方法中对消通道接入了放大器,无源方法中接入了衰减器,两种方法均会导致接收通道的噪声系数改变。国内外许多学者对干扰对消技术进行了探索和研究,但研究热点集中在提升对消系统的对消比、对消收敛时间、对消带宽等性能^[5-10],以及对消技术在共址收发干扰中的应用^[11-14],对强耦合干扰对消技术研究较少,文献[15]虽涉及同车电台强耦合干扰对消技术,但未提到具体对消方法,且限于仿真研究;也未见公开文献报道研究强耦合干扰对消系统接收通道噪声系数。

1 弱耦合干扰对消噪声系数分析

当共址耦合干扰较弱时,可采用一般无源干扰对消技术解决干扰问题。一般无源干扰对消系统原理框图如图1所示。

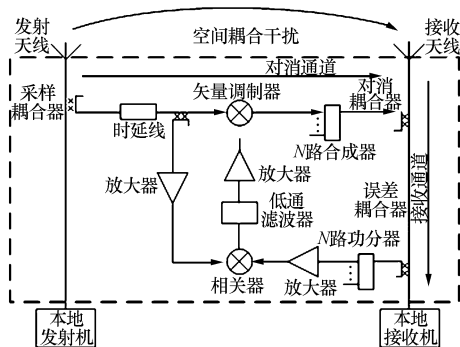


图1 一般无源干扰对消系统原理框图

对消系统的对消通道和接收信号通道可只包含无源器件。当对消通道的功率传输系数不小于空间耦合通道功率传输系数时,干扰对消系统才能对消干扰信号。功率传输系数定义为器件或传输通道的输出功率/输入功率。忽略耦合器与互联结构的附加损耗,用公式表示为:

$$\frac{S_s S_v S_c}{N} \geq (1 - S_s) S_i (1 - S_c) \quad (1)$$

其中, S_s 为采样耦合器输入端到耦合端功率传输系数、 S_v 为矢量调制器最小损耗时的功率传输系数、 S_c 为对消耦合器输入端到耦合端功率传输系数、 S_i 为发射天线到接收天线的空间耦合功率传输系数, N 为合成器的合成通道数。由式(1)可推得

$$S_i \leq \frac{S_s S_v S_c}{N(1 - S_s)(1 - S_c)} \quad (2)$$

忽略耦合器的损耗和连接插损,接收通道(SoI)

信号经对消耦合器耦合端、误差耦合器后的插损 L_{soi} 可表示为

$$L_{soi} = \frac{1}{(1 - S_c)(1 - S_r)} \quad (3)$$

式中, S_r 为误差耦合器输入端到耦合端传输系数。

接收通道的输出噪声 N_o 由三部分构成:天线、对消耦合器与误差耦合器输入噪声的总和,可表示为

$$N_o = kTB[(1 - S_c)(1 - S_r) + S_c(1 - S_r) + S_r] = kTB \quad (4)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数, T 为环境温度, B 为噪声带宽。由式(4)可知,在室温290 K,且电路各端口匹配时,接收通道的输出噪声 N_o 与输入噪声 N_i 相等。接收通道的噪声系数可表示为

$$F_{soi} = L_{soi} \frac{N_o}{N_i} = L_{soi} \frac{kTB}{kTB} = L_{soi} \quad (5)$$

上式表明,弱耦合干扰对消下接收通道的噪声系数 F_{soi} 与插入损耗 L_{soi} 相等。

2 强耦合干扰对消噪声系数分析

若收发天线间耦合强,设干扰对消系统的参数 $N=1$ (单通道对消系统), $S_i=0.1$ (即收发天线间耦合度为10 dB), $S_c=0.5$, $S_v=0.1$,代入式(1)可得 $S_s \geq 0.5$,即取样功率占发射机输出功率的50%以上;若参数 $N=4$ (四通道对消系统),另3个参数不变,可得 $S_s \geq 0.8$,即取样功率占发射机输出功率的80%以上。因此,采用一般无源干扰对消技术,不适合应用于共址强耦合干扰情况,需采用改进的对消方法。改进方法可在对消通道放大取样信号,或者在接收通道衰减干扰信号。图2给出了强耦合干扰对消系统与一般无源干扰对消系统的不同。有源方法是在对消通道插入放大器,插入位置对应图2中标注“放大器”的位置;无源方法是在接收通道插入衰减器,插入位置对应图2中标注“衰减器”的位置;改进的无源方法是在接收通道插入衰减器,并将对消耦合器的耦合端连接天线输入端口,对消耦合器的直通端连接对消通道合成器的输出端。下面将分析这三种方法下接收通道的噪声系数。

2.1 有源方法

强耦合干扰条件下,可在对消通道上引入低噪声功率放大器(放大器输出与对消耦合器的耦合端相连)。放大器的噪声系数与增益分别为 F_a 和 G_a ,则式(2)可改写为

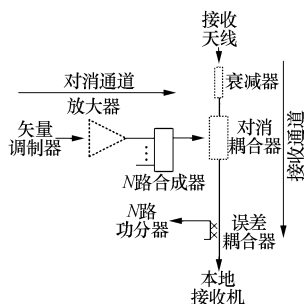


图2 强耦合干扰对消方法

$$S_i \leq \frac{S_s S_v S_c G_a}{N(1 - S_s)(1 - S_c)} \quad (6)$$

则对消通路有放大器时接收通道的输出噪声为 N_{cl}

$$N_{o1} = kTB[(1 - S_c)(1 - S_r) + F_a G_a S_c(1 - S_r) + S_r] \quad (7)$$

因此,新的噪声系数为

$$F_{\text{soil}} = L_{\text{soil}} \frac{N_{\text{oi}}}{N_{\text{i}}} = \frac{kTB}{(1 - S_{\text{c}})(1 - S_{\text{r}})} \cdot \frac{[(1 - S_{\text{c}})(1 - S_{\text{r}}) + F_{\text{a}}G_{\text{a}}S_{\text{c}}(1 - S_{\text{r}}) + S_{\text{r}}]}{kTB} = F_{\text{soil}} + \frac{S_{\text{c}}(F_{\text{a}}G_{\text{a}} - 1)}{(1 - S_{\text{r}})} \quad (8)$$

当放大器增益和噪声系数均为 1 时, $F_{\text{soil}} = F_{\text{soil}0}$ 。当使用放大器时, 增加的噪声系数等于式 (8) 除以式 (5), 得

$$F_{il} = \frac{F_{soil}}{F_{soi}} = \frac{F_{soi} + S_c(F_a G_a - 1)/(1 - S_c)}{F_{soi} \frac{S_c(F_g G_g - 1)(1 - S_r)}{S_c(F_g G_g - 1)(1 - S_r)}} = \quad (9)$$

2.2 无源方法

强耦合干扰条件下,为对消强干扰信号,也可在对消通道上插入衰减器(接入接收天线和对消耦合器之间),则式(2)改写为

$$S_i \leq \frac{L_s S_s S_v S_c}{N(1 - S_e)(1 - S_e)} \quad (10)$$

其中, L_s 为插入的衰减器的衰减量, 则

$$L_s \geq \frac{NS_i(1 - S_s)(1 - S_c)}{S_s S_c} \quad (11)$$

因此对应接收通道的噪声系数为接收通道的插损,表示为

$$F_{\text{soi2}} = \frac{L_s}{(1 - S_o)(1 - S_v)} \quad (12)$$

比较式(3)、式(9)和式(12),若使有源方法和无源方法接收通道的噪声系数相同,则接收通道插入的衰减器的衰减量 $L_s = F_{i1}$ 。

2.3 改进的无源方法

2.2 节所述的无源对消方法直接衰减接收通道的干扰信号,使该干扰信号与对消通道的信号大小相等相位相反,实现干扰对消。但该方法中取样信号功率在耦合器中消耗过大,可以采用改进的无源方法,即将天线输入连接到对消耦合器的耦合端,将对消通道合成器的输出端连接到对消耦合器的直通端,即对消耦合器连接对消通道与接收通道天线的端口互换,这样减少了对消通道取样功率在耦合器中的消耗,相比无源方法,该方法可降低取样功率,减少发射功率的损耗。为满足对消条件,接收通道视情况插入衰减器,则式(2)改写为

$$S_i \leq \frac{S_s S_v (1 - S_c) L'_s}{N S_o (1 - S_c)} \quad (13)$$

其中, L' 为插入衰减器的衰减量。

$$L'_s \geq \frac{NS_i S_c (1 - S_s)}{S_c S_v (1 - S_c)} \quad (14)$$

$$S_c \leq \frac{L'_s S_s S_v}{L'_c S_c S_v + NS_i(1 - S_c)} \quad (15)$$

最优情况时,插入的衰减器衰减量为 0 dB,即 $L'=1$,此时

$$S_c \leq \frac{S_s S_v}{S_c S_v + N S_i (1 - S_c)} \quad (16)$$

修改连接方式后的对消通道噪声系数 F_{soi2} 为 (等于接收通道的插损)

$$F_{\text{soi2}} = \frac{L'_s}{S_o(1 - S_r)} \quad (17)$$

当处于最优方法时,接收通道的噪声系数为

$$F_{\text{soi2}} = \frac{1}{S_c(1 - S_r)} \quad (18)$$

3 接收通道噪声系数比较

当无源方法中插入的衰减器衰减量取值合适时,有源方法与无源方法接收通道的噪声系数可相

等。因此,只需比较有源方法与改进的无源方法的接收通道的噪声系数。为便于比较,这里给出了典型算例。

假定收发天线耦合度 10 dB,对消系统采样耦合器耦合度 10 dB,对消耦合器耦合度 6 dB,误差耦合器耦合度 20 dB,矢量调制器最小损耗 10 dB,表 1—表4是当参考信号功率裕量分别为0 dB、1 dB、

2 dB、3 dB 时,计算出的有源方法的放大器增益 G_a 、噪声系数 F_{soi1} ,无源方法的衰减器衰减量 L_s ,最优的改进无源方法的耦合器耦合度、噪声系数 F_{soi2} ,以及改进的无源方法相对有源方法的噪声系数改善 $F_{\text{soi1}} - F_{\text{soi2}}$ 。从表 1—表 4 可见,最优的改进无源方法相对有源方法的噪声系数均有改善,改善量接近放大器的噪声系数。

表 1 $F_a = 1$ dB 时单通道对消系统接收通道器件参数和噪声系数

对消通道 增益裕量/dB	G_a /dB	L_s /dB	改进的无源方法 耦合器耦合度/dB	F_{soi1} /dB	F_{soi2} /dB	$F_{\text{soi1}} - F_{\text{soi2}}$ /dB
0	14.2861	9.6146	10.0000	10.9145	10.0436	0.8708
1	15.2861	10.5406	10.9097	11.8405	10.9534	0.8871
2	16.2861	11.4809	11.8367	12.7809	11.8803	0.9005
3	17.2861	12.4330	12.7778	13.7329	12.8214	0.9115

表 2 $F_a = 4$ dB 时单通道对消系统接收通道器件参数和噪声系数

对消通道 增益裕量/dB	G_a /dB	L_s /dB	改进的无源方法 耦合器耦合度/dB	F_{soi1} /dB	F_{soi2} /dB	$F_{\text{soi1}} - F_{\text{soi2}}$ /dB
0	14.2861	12.4330	10.0000	13.7329	10.0436	3.6892
1	15.2861	13.3945	10.9097	14.6944	10.9534	3.7410
2	16.2861	14.3636	11.8367	15.6636	11.8803	3.7832
3	17.2861	15.3390	12.7778	16.6389	12.8214	3.8175

表 3 $F_a = 1$ dB 时四通道对消系统接收通道器件参数和噪声系数

对消通道 增益裕量/dB	G_a /dB	L_s /dB	改进的无源方法 耦合器耦合度/dB	F_{soi1} /dB	F_{soi2} /dB	$F_{\text{soi1}} - F_{\text{soi2}}$ /dB
0	20.3067	15.3591	15.6820	16.6591	15.7257	0.9334
1	21.3067	16.3396	16.6578	17.6395	16.7015	0.9380
2	22.3067	17.3240	17.6385	18.6239	17.6821	0.9418
3	23.3067	18.3115	18.6231	19.6114	18.6667	0.9447

表 4 $F_a = 4$ dB 时四通道对消系统接收通道器件参数和噪声系数

对消通道 增益裕量/dB	G_a /dB	L_s /dB	改进的无源方法 耦合器耦合度/dB	F_{soi1} /dB	F_{soi2} /dB	$F_{\text{soi1}} - F_{\text{soi2}}$ /dB
0	20.3067	18.3115	15.6820	19.6114	15.7257	3.8857
1	21.3067	19.3016	16.6578	20.6015	16.7015	3.9000
2	22.3067	20.2937	17.6385	21.5936	17.6821	3.9115
3	23.3067	21.2874	18.6231	22.5874	18.6667	3.9207

接收通道噪声系数改善量与放大器的噪声系数密切相关,图 3、图 4 分别为单通道和四通道对消系统最优改进无源方法相对有源方法的接收通道噪声系数改善量与放大器噪声系数的关系。由图可见,在同一放大器噪声系数,0~3 dB 的参考信号功率裕量范围内,接收通道噪声系数改善量接近;接收通道噪声系数改善量随放大器噪声系数的增加而呈线性增加;当放大器噪声系数大于 0.1 dB 时,最优改进无源方法的接收通道噪声系数均低于有源方法的噪

声系数。

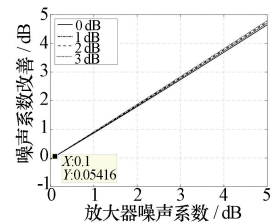


图 3 单通道噪声系数改善

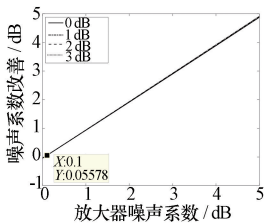


图 4 四通道噪声系数改善

最优改进无源方法要求对消耦合器有对应的精确的耦合度,实际耦合器值难以符合要求。图 5、图 6 分别给出了单通道、四通道对消系统中,固定对消耦合器耦合度为 6 dB,假定收发天线耦合度 10 dB,采样耦合器耦合度 10 dB,误差耦合器耦合度 20 dB,矢量调制器最小损耗10 dB,参考功率增益裕量为 0 dB、3 dB 时的接收通道噪声系数改善情况。从图 5、图 6 可见,放大器噪声系数大于 1.3 dB 时,改进的无源方法优于有源方法的噪声系数。

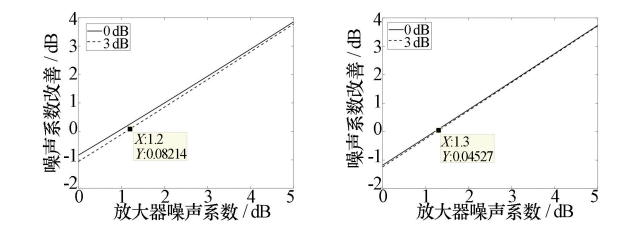


图 5 单通道对消系统固定对消耦合器耦合值噪声系数改善

图 6 四通道对消系统固定对消耦合器耦合值噪声系数改善

通过上文的分析,当放大器的噪声系数大于 0.1 dB 时,单通道和四通道对消系统采用最优改进的无源方法比有源方法有更好的噪声系数;当放大器的噪声系数大于 1.3 dB 时,单通道和四通道对消系统采用固定耦合器耦合度的改进无源方法也有优势。在工程实践中,低噪声放大器的噪声系数一般大于 1.3 dB,因此采用有源对消方法时,虽然有用信号的功率损失小,但有源对消方法使噪声增加,接收通道实际信噪比相对改进无源方法降低;同时低噪声功率放大器容易出现非线性失真,产生新的干扰;有源方法也增加了直流电源功率损耗。因此,强耦合干扰对消系统采用改进的无源方法是更好的选择。

4 实验验证

为验证上述分析,建立了 140~180 MHz 的单通道对消系统平台,频带内用10 dB衰减器(平坦度 ± 0.2 dB)模拟收发天线耦合,采样耦合器耦合度 10 dB(平坦度 ± 0.3 dB),对消耦合器耦合度为 10 dB(平坦度 ± 0.3 dB),误差耦合器耦合度 20 dB(平坦度 ± 0.5 dB),放大器增益为 20 dB(平坦度 ± 0.5 dB)、噪声系数为 4.3 dB(平坦度 ± 0.1 dB)。使用 ROHDE&SCHWARZ 公司的 ZVL 仪器测量了频带内的对消系统接收通道噪声系数,测量结果见图 7。图 7 中有源方法的噪声系数约为 14.5 dB,不加衰减器改进无源方法的噪声系数为 10.5 dB,噪声系数改善量约 4.0 dB。依据公式(9)、(17)计算,接收通道有源方法的噪声系数为 14.9020 dB,不加衰减器

的改进无源方法的噪声系数为 10.0436 dB,噪声系数改善 4.8584 dB。由于未考虑耦合器、电缆和连接器功耗引起的插损,以及实际器件参数的平坦度等影响,计算结果与测量结果有一定偏差,但足以证明改进无源方法相对有源方法,改善了接收通道的噪声系数。

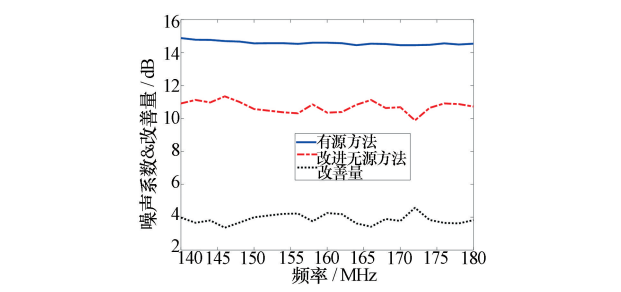


图 7 实测单通道对消系统噪声系数

5 结论

本文在一般无源对消方法的基础上提出了用于抑制强耦合干扰的改进无源对消方法,推导了对消系统接收通道的噪声系数公式,计算了典型通道数的对消系统接收通道的噪声系数;建立了单通道对消系统实验平台,测试了改进无源方法和有源方法下单通道对消系统的接收通道噪声系数。得到了以下结论:

- 1)对消通道不同增益裕量时,最优的改进无源方法相对有源方法的噪声系数均有较大改善;在固定耦合器耦合度情况下,改进无源方法的噪声系数改善量有所下降,但在实际工程条件下仍优于有源对消方法的噪声系数。
- 2)在实际工程条件下,改进的无源对消方法比有源对消方法的接收通道噪声系数更低;且有源方法增加了电源功率损耗,低噪声功率放大器的非线性失真产生新的干扰;因此,采用改进的无源方法的对消系统是解决强耦合干扰问题的更优选择。

参考文献

[1] Adrian S E. Performance of alternative adaptive interference canceller configurations in a shipboard environment [A]. IEEE Military Communications Conference [C], Washington D C, USA,1983. 537-543

[2] Travis G W, Lenzing H F. Shipboard HF interference: problems and mitigation[A]. IEEE Military Communications Conference[C], Boston, USA, 1989. 106-110

[3] Kim S J, Lee J Y, Lee J C, et al. Adaptive feedback interference cancellation system [A]. IEEE MTT-S Interna-

- tional Microwave Symposium Digest [C], Philadelphia, USA, 2003. 627-630
- [4] 郑伟强, 杜武林. 自适应干扰抵消研究[J]. 电讯技术, 1991, 31(6): 20-27
Zheng W Q, Du W L. Study of adaptive interference canceling[J]. Telecommunication Engineering, 1991, 31(6): 20-27
- [5] 马义广, 杜武林. 自适应干扰抵消系统的性能分析与设计[J]. 西安电子科技大学学报, 1992, 19(1): 84-92
Ma Y G, Du W L. Performance analysis and design of adaptive interference canceling system[J]. Journal of Xidian University, 1992, 19(1): 84-92
- [6] 姚中兴, 李华树, 任桂兴. 通信自适应干扰抵消系统的性能分析[J]. 西安电子科技大学学报, 1995, 22(3): 256-261
Yao Z X, Li H S, Ren G X. Performance analysis of adaptive interference cancellation system in communication[J]. Journal of Xidian University, 1995, 22(3): 256-261
- [7] Li W L, Zhao Z H, Tang J, et al. Performance analysis and optimal design of the adaptive interference cancellation system[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(6): 1068-1075
- [8] 蒋云昊, 马伟明, 赵治华. 斩波稳零下自适应干扰抵消系统的性能分析[J]. 通信学报, 2010, 31(3): 65-74
Jiang Y H, Ma W M, Zhao Z H. Analysis of chopping stabilizing zero for adaptive interference cancellation system[J]. Journal on Communications, 2010, 31(3): 65-74
- [9] 蒋云昊, 马伟明, 赵治华, 等. 自适应干扰抵消系统中的时延匹配[J]. 电子学报, 2011, 39(8): 1927-1931
Jiang Y H, Ma W M, Zhao Z H, et al. Delay matching in adaptive interference cancellation system[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(8): 1927-1931
- [10] Jiang Y H, Ma W M, Zhao Z H. Influence of non quadrature of phase shifter to adaptive interference cancellation system[A]. International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics [C], Hangzhou, China, 2009. 359-363
- [11] Korpi D, Tamminen J, Turunen M, et al. Full-duplex mobile device: pushing the limits [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(9): 80-87
- [12] Kolodziej K E, McMichael J G, Perry B T. Multitap RF canceller for in-band full-duplex wireless communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(6): 4321-4334
- [13] Xiong H L. An efficient narrowband interference suppression approach in ultra-wideband receiver[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(9): 2741-2748
- [14] 郑久栋, 王鹏飞, 吴鸿超, 等. 一种相控阵雷达射频域自干扰抵消方法[J]. 微波学报, 2020, 36(5): 47-50
Zheng J D, Wang P F, Wu H C, et al. An approach to canceling self-interference at RF domain in phase array radar[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(5): 47-50
- [15] 刘建成, 赵宏志, 全厚德, 等. 结合天线互耦分析的同车电台射频干扰抵消[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(11): 2598-2605
Liu J C, Zhao H Z, Quan H D, et al. RF interference cancellation based on antennas coupling analysis for radios on the co-vehicle[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(11): 2598-2605

李 毅 男, 1977年生, 副研究员, 硕士生导师。主要研究方向: 射频电路, 电磁兼容与计算电磁学。

何方敏 (通信作者) 男, 1982年生, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 电磁兼容, 数字信号处理。

E-mail: hefangminemc@126.com

李 阳 男, 1992年生, 助理研究员。主要研究方向: 电磁兼容。

孟 进 男, 1977年生, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 电力电子系统的电磁兼容。