

阵列互耦对极化敏感阵列滤波性能的影响

刘 勇,徐振海,肖顺平

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 在阵列互耦条件下,给出了极化敏感阵列接收信号模型;并在形式上把互耦误差分解为正交阵元接收因子误差和阵列接收因子误差,分别代表了阵列接收信号极化信息误差和空间信息误差.给出互耦条件下,信号、干扰空间匹配系数、极化匹配系数和最大 SINR 的数学表达式.在单干扰源情况下,分析了阵列互耦对极化敏感阵列滤波性能的影响.

关键词: 阵列互耦;极化;极化敏感阵列;信号干扰噪声比

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12-2303-04

The Effect of Array Mutual Coupling on Filtering Performance of Polarization Sensitive Array

LIU Yong, XU Zhen-hai, XIAO Shun-ping

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: The received signal model of polarization sensitive array is presented under array mutual-coupling condition, then mutual coupling error is decomposed of orthogonal-array-element-factor-error and array-factor-error, which represent signal polarizational information error and spatial information error respectively. Under array mutual-coupling condition, we give the mathematical expressions of some important filtering parameters, such as spatial matching coefficient, polarizational matching coefficient, and the maximum SINR. Then under condition of one interference source, effect of array mutual coupling on filtering performance of polarization sensitive array is analyzed.

Key words: array-mutual-coupling; polarization; polarization sensitive array; signal-interference-noise-ratio (SINR)

1 引言

在抑止干扰、改善信号接收质量方面,极化敏感阵列^[1]具有特有优势.极化敏感阵列既可以利用期望信号和干扰信号空间到达角差异,实现空域滤波,也可以利用极化状态差异,实现极化滤波,该天线阵列比普通阵列具有更强的抗干扰性能^[3].

国内外关于极化敏感阵列的研究主要集中在信号到达角(DOA)和极化状态的联合估计问题上^[1,2].在极化敏感阵列滤波方面,文献[3]在单干扰源条件下,分析了理想极化敏感阵列的滤波性能.

但在实际工程中,阵列天线互耦难以避免^[4,5,9,11].阵列互耦问题历来是天线设计和信号处理方面的重要问题,国内外对阵列互耦的研究主要集中在互耦建模,及其对阵列滤波性能和 DOA 估计影响的问题上,并提出一些互耦校正算法.文献[4]分析了阵列互耦对普通阵列天线滤波性能参数 SINR 的影响;文献[6]给出较完整的阵列互耦误差模型,分析了互耦对高分辨谱的影响;文献[7]在均匀线阵互耦模型(互耦系数矩阵为一 Toeplitz 矩阵)的基础上,给出了 DOA 估计的鲁棒算法;文献[8]分析了互耦对 CDMA 阵列天线空间滤波性能的影响.但关于阵列互耦对极化敏感阵列滤波性能及对空域、极化域参数联合估计影响的问题还未见到报道.

本文首先建立了阵列互耦条件下,极化敏感阵列信号模型,并把互耦误差分解为极化信息误差和孔径信息误差,给出其明确的物理解释.在文献[3]的基础上,分析了互耦对极化敏感阵列滤波性能参数空间匹配系数、极化匹配系数和 SINR 的影响.

2 阵列互耦条件下,极化敏感阵列信号模型

对于 N 个正交偶极子对构成的均匀线阵(如图 1 所示),阵元的两个正交偶极子分别沿 x 轴和 y 轴排列,各个阵元沿 y 轴均匀排列,间距为 d .信号和阵列满足窄带假设、远场假设、短阵子假设、传播介质假设条件^[1],但阵元孤立条件不再满足.

实际上,阵元敏感到的信号,一部分能量被后面电路吸收,另一部分能量被再次辐射,从而产生阵元间的相互影响^[6].本文借鉴文献[6]的分析方法,建立了极化敏感阵列的互耦误差模型.

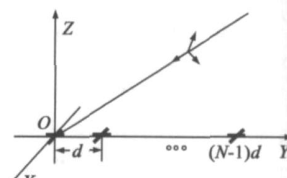


图 1 极化敏感阵列线阵模型

2.1 阵列互耦条件下,信号极化信息误差模型

水平极化(H)、垂直极化(V)偶极子分别敏感到入射波的水平、垂直极化分量,具有全极化接收能力^[1,2].而正交偶极

子间的互耦通常被忽略.但由于正交偶极子间极化隔离度的不理想, H、V 偶极子会敏感到彼此辐射的能量^[5].互耦对正交偶极子接收信号的影响可以看作是极化信息误差.

对于完全极化波,极化信息可以通过极化角(,)表征.其中:0 90°, 0° 360°.

设入射信号为: $s(t) = [\cos \theta, \sin \theta e^{j\phi}]^T s(t)$ 考虑正交偶极子间互耦的影响,接收信号为:

$$s(t) = U \cdot s \cdot s(t) = \begin{bmatrix} 1, & g_{VH} \\ g_{HV}, & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-g_H} & \sqrt{g_V} \\ \sqrt{g_H} & \sqrt{1-g_V} \end{bmatrix} \cdot s \cdot s(t) \quad (1)$$

其中: 表示 Hadamard 积,

$$U = \begin{bmatrix} 1, & g_{VH} \\ g_{HV}, & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-g_H} & \sqrt{g_V} \\ \sqrt{g_H} & \sqrt{1-g_V} \end{bmatrix}$$

为信号极化信息误差矩阵,

g_{HV} 、 g_{VH} 分别表示 H、V 通道复增益, g_H 、 g_V 分别代表 H、V 通道的辐射功率系数, g_H 、 g_V 、 g_{HV} 、 g_{VH} 共同影响偶极子间的互耦强度^[6].

本文在简化问题的基础上,设 $g_H = g_V = g$, $g_{HV} = g_{VH} = g$.这样,互耦条件下,正交偶极子天线接收信号为:

$$s(t) = \begin{bmatrix} \sqrt{1-g} \cos \theta + g \sqrt{\sin \theta} e^{j\phi} \\ g \sqrt{\cos \theta} + \sqrt{1-g} \sin \theta e^{j\phi} \end{bmatrix} s(t) \quad (2)$$

可以看出,互耦对接收信号能量和极化信息都会产生影响.对于极化敏感阵列,接收信号极化信息与来波方向有关,所以极化信息误差也与来波方向有关.

2.2 阵列互耦条件下,信号孔径信息误差模型

对于间距很小的天线阵列,阵列互耦在所难免.在极化敏感阵列中,由于 H 通道偶极子相互平行,V 通道偶极子成“一”字排列,都存在互耦影响.通常阵列互耦模型由电路阻抗矩阵表示^[4,11],这里采用文献[6]给出的互耦模型. H 通道为 N 个阵元的均匀线阵.在互耦条件下,接收信号为:

$$s_H(t) = C_H \cdot s_s \cdot s_H(t) = G_H \cdot A_H \cdot s_s \cdot s_H(t)$$

$$= \begin{bmatrix} 1, & \dots, & g_{1,N} \\ \dots & & \\ g_{N,1}, & \dots, & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-g_1} & 1, & \dots, & \sqrt{g_N} \\ \dots & & & \\ \sqrt{g_1} & 1, & \dots, & \sqrt{1-g_N} \end{bmatrix} \cdot s_s \cdot s_H(t) \quad (3)$$

其中:互耦矩阵 $C_H = G_H \cdot A_H$, $G_H = \begin{bmatrix} 1, & \dots, & g_{1,N} \\ \dots & & \\ g_{N,1}, & \dots, & 1 \end{bmatrix}$ 为复增益

矩阵, $A_H = \begin{bmatrix} \sqrt{1-g_1} & 1, & \dots, & \sqrt{g_N} \\ \dots & & & \\ \sqrt{g_1} & 1, & \dots, & \sqrt{1-g_N} \end{bmatrix}$ 为功率辐射系数矩阵, $g_{i,k}$ 表示第 i 个偶极子对第 k 个偶极子辐射信号的复增益, g_i 表示第 i 个偶极子的功率辐射系数, s_s 为信号空间导向矢量.

对于均匀线阵,复增益矩阵 G_H 为一个条带对称 Toeplitz 矩阵^[7],即有:

$$\begin{cases} g_{i,j} = g_{1,|i-j|+1} \\ g_{1,j} = 0, j > p \\ g_{1,1} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中: $1 \leq i, j \leq N$.

由阵列天线理论可知,阵列互耦与入射波频率,阵元间距及天线扫描角度有关.本文在窄带、窄扫描角条件下,认为 G_H 是一未知常数矩阵.可以通过矩量法(MOM)和近场校准的方法得到^[11]. $g_{i,j}$ 随 i, j 阵元间距增大而迅速减小.

当取 $p=1$,复增益矩阵只有一个未知量 g ,即只认为相邻偶极子之间存在互耦影响.

同理,V 通道偶极子间的互耦也可以用复增益矩阵和功率辐射系数矩阵 $C_V = G_V \cdot A_V$ 来描述.

当阵列偶极子间距很小时,可以认为 H 通道、V 通道间的复增益矩阵和功率辐射矩阵相等,统一用 $C = G \cdot A$ 表示.这样,存在互耦影响下,H 通道、V 通道接收信号分别为:

$$s_H(t) = C \cdot s_s \cdot s_H(t), s_V(t) = C \cdot s_s \cdot s_V(t) \quad (5)$$

其中: $s_s = \frac{1}{\sqrt{N}} [1 - q \quad q^2 \quad \dots \quad q^{N-1}]^T$ 为理想情况下信号空间导向矢量, $q = e^{j2d \sin \theta}$ 为空间相移因子.

2.3 阵列互耦条件下,极化敏感阵列信号误差模型

在假设各个正交偶极子间的极化信息误差矩阵相等,及 H、V 通道阵列互耦矩阵相等的条件下,极化敏感阵列天线接收信号矢量为:

$$s(t) = (U \cdot s_p) \odot (C \cdot s_s) s(t) \quad (6)$$

其中:“ \odot ”表示 Kronecker 积, $s(t)$ 为互耦条件下,极化敏感阵列接收信号矢量. $C \cdot s_s$ 为此时的信号空间导向矢量, $U \cdot s_p$ 为信号极化矢量.此时信号导向矢量可写为:

$$s = (U \cdot s_p) \odot (C \cdot s_s) = (U \odot C) \cdot (s_p \odot s_s) \quad (7)$$

综上所述,极化敏感阵列的互耦误差可分解为阵元极化误差和阵列孔径误差.矩阵 U 表示正交偶极子间互耦对接收信号极化信息的影响,矩阵 C 表示阵列孔径信息的扰动.

从式(7)可以看出,在综合考虑互耦影响时,信号导向矢量可以写成如下形式:

$$s = M \cdot (s_p \odot s_s) \quad (8)$$

其中: $M = U \odot C$.

这样得到的极化敏感阵列互耦模型为:第 i 个水平偶极子 H_i 接收信号既受 H_{i-1} 、 H_{i+1} 的耦合影响,也受到 V_{i-1} 、 V_i 、 V_{i+1} 较小的耦合影响;同理 V_i 接收信号既受 V_{i-1} 、 V_{i+1} 的耦合影响,也受到 H_{i-1} 、 H_i 、 H_{i+1} 较小耦合影响.

3 阵列互耦对滤波性能的影响

极化敏感阵列通过 $2N$ 个偶极子独立进行幅度、相位加权,在干扰、噪声环境下实现极化域—空域联合信号处理.阵列自适应滤波本质上是在特定目标函数和约束准则下的最优信号处理问题.常用的目标函数有输出 SINR 最大准则、MMSE 准则、主瓣约束准则和干扰抑制准则等^[1].本文以 SINR 最大准则分析互耦对极化敏感阵列滤波性能的影响.

极化敏感阵列具有空间滤波和极化滤波能力,当信号和干扰的空间距离较大时,空间滤波就能达到好的滤波效果;而当信号和干扰的空间距离较近时,要利用两者的极化信息差异进行滤波^[3].这里以第 2 部分建立的互耦误差模型,分析互

耦对极化敏感阵列滤波性能的影响。

互耦条件下,以 SINR 最大准则得到的最大信号干扰噪声比为^[3]:

$$\text{SINR}_{\max} = NP_s s^H R^{-1} s \quad (9)$$

其中: $R = \frac{2}{n} E_{2N} + NP_i i \cdot i^H$ 为互耦条件下的干扰噪声相关矩阵, $P_s = E\{|s(t)|^2\}$ 为期望信号功率, s 、 i 分别为此时期

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{\max} &= \text{ASNR} \cdot s^H \left\{ 1 - \frac{\text{AINR}}{1 + \text{AINR}} \frac{|i_s|^2 \cdot |s_p|^2 \cdot |i_p|^2}{|s_s|^2 \cdot |i_s|^2} \right\} \\ &= \text{ASNR} \cdot s_p^2 \cdot s_i^H \left\{ 1 - \frac{\text{AINR}}{1 + \text{AINR}} \frac{|i_p|^2 \cdot |i_s|^2 \cdot |s_s|^2}{|s_s|^2 \cdot |i_s|^2} \cdot \frac{|s_p|^2 \cdot |i_p|^2}{s_p^2 \cdot i_p^2} \right\} \\ &= \text{ASNR} \cdot s_p^2 \cdot s_s^H \{1 - M_p \cdot M_s\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $\text{ASNR} = \frac{NP_s}{2}$, $\text{AINR} = \frac{NP_i}{2}$, $s_s = C \cdot s_s$ 为存在互耦时的信号空间矢量, $s_p = U \cdot s_p$ 为对应信号极化矢量, $i_s = C \cdot i_s$ 为存在互耦时的干扰空间矢量, $i_p = U \cdot i_p$ 为对应干扰极化矢量, M_p 为此时信号、干扰极化匹配系数, M_s 为空间匹配系数。

比较式(10)与文献[3]中的结果可以看出,极化敏感阵列中的互耦误差分解为极化矢量误差和空间矢量误差,从而引起在滤波过程中,信号、干扰空间匹配系数和极化匹配系数的变化,影响滤波性能。通过这样分解,给出了互耦误差清晰的物理解释。

阵列互耦使极化敏感阵列接收信号导向矢量发生了变化,其模长的平方变为:

$$s_s^2 = s_p^2 \cdot s_s^2 = (s_p^H \cdot U^H \cdot U \cdot s_p) \cdot (s_s^H \cdot C^H \cdot C \cdot s_s) \quad (11)$$

极化匹配系数反映的是信号、干扰间的极化差异,正交偶极子间的互耦使接收信号极化信息不同于入射波极化信息,势必对信号、干扰极化匹配系数产生影响。互耦条件下,信号、干扰的极化匹配系数表示为:

$$M_p = \frac{|s_p \cdot i_p|^2}{s_p^2 \cdot i_p^2} = \frac{|U \cdot s_p \cdot U \cdot i_p|^2}{U \cdot s_p^2 \cdot U \cdot i_p^2} \quad (12)$$

其中: U 为信号极化信息误差矩阵, s_p 、 i_p 分别为期望信号、干扰极化矢量。

从上式可以看出,信号、干扰间的极化匹配系数受到正交偶极子天线间互耦的影响,影响程度还与两者极化状态有关,同时,接收信号、干扰的极化状态是入射角度的函数,所以极化匹配系数也受信号、干扰入射角度的影响。

空间匹配系数反映的是期望信号、干扰间的入射角度差异,理想情况下,空间匹配系数为^[3]:

$$M_s = \frac{\sin\left[\frac{Nd}{2}(\sin s_s - \sin i_s)\right]}{N^2 \sin^2\left[\frac{d}{2}(\sin s_s - \sin i_s)\right]} \quad (13)$$

存在阵列互耦情况下,信号、干扰空间匹配系数不同于理想值,可以表示为:

$$M_s = \frac{|s_s \cdot i_s|^2}{s_s^2 \cdot i_s^2} = \frac{|s_s^H \cdot C^H \cdot C \cdot i_s|^2}{C \cdot s_s^2 \cdot C \cdot i_s^2} \quad (14)$$

其中: C 为阵列互耦矩阵; s_s 、 i_s 分别为期望信号、干扰空间导向矢量。当 $C = I$ 时,空间匹配系数等于理想值。

极化敏感阵列的滤波性能 SINR_{\max} 依赖于信号、干扰的空间信息差异和极化信息差异,在单干扰源情况下, SINR_{\max} 可以

望信号、干扰的导向矢量,并且有: $s = (U \cdot s_p) \odot (C \cdot s_s)$, $i = (U \cdot i_p) \odot (C \cdot i_s)$ 。

利用矩阵求逆公式,可以得到此时的最大信号干扰噪声比为:

表示为信号、干扰的空间匹配系数和极化匹配系数的形式。可以看出正交偶极子间的互耦、阵列间的互耦对信号、干扰的极化匹配系数及空间匹配系数产生影响。式(12)和式(14)得到了在互耦条件下,信号、干扰的极化匹配系数和空间匹配系数,从而可以得到极化敏感阵列在互耦条件下的滤波性能。

滤波改善因子(IF)定义为: $\text{IF} = \frac{\text{SINR}_{\max}}{\text{SINR}_{\text{in}}}$ 。本文用 IF 来分析互耦误差对 SINR_{\max} 的影响。

4 仿真结果

为分析阵列互耦对极化敏感阵列滤波性能的影响,利用本文第 3 部分得到的结果,分别分析阵列接收误差对信号、干扰极化匹配度的影响,阵列空间误差对空间匹配度的影响,最后综合得到对滤波性能参数 SINR_{\max} 的影响。

正交偶极子间的互耦会使期望信号、干扰间的极化匹配系数产生误差(见式(12)),极化匹配系数的误差量与信号、干扰的极化状态及入射角度有关。同样, H、V 通道间的阵列互耦会使信号、干扰的空间匹配系数产生误差(见式(14)),误差量也与信号、干扰的空间信息有关。

以下分析阵列互耦对极化敏感阵列滤波性能参数 SINR_{\max} 的影响。图 2、图 3 是在互耦条件下, SINR_{\max} 随干扰信号入射方向的变化曲线。图中条件: $d = 0.5$, $\text{SNR} = 0\text{dB}$, $\text{INR} = 20\text{dB}$, $s_s = 30^\circ$, $s_i = 45^\circ$, $s_i = i_i = 90^\circ$ 。图 2 中,干扰极化信息与期望信号极化信息相等($i_i = 45^\circ$),图 3 中,干扰极化信息与期望信号极化信息不同($i_i = 30^\circ$)。从图中可以看出,极化敏感阵列可以实现空间滤波和极化滤波,在干扰、期望信号的入射角差异较大时,空间滤波可以达到较好的效果,与两者的极化信息差异关系不大。当两者的入射角差异较小,而极化信息差异较大时,极化滤波也能实现较好的滤波效果。滤波性能随互耦强度的增加会下降,并且当期望信号、干扰的极化或空间信息不同时,互耦对滤波性能的影响程度是不同的。

极化敏感阵列的滤波改善因子与期望信号、干扰的入射角差异有关,并且随互耦强度的增强会不断下降。图 4 是在 $s_s = 30^\circ$, $s_i = 45^\circ$, $s_i = 90^\circ$, $i_i = 60^\circ$, $i_i = 90^\circ$ 情况下,互耦强度为: $g_c = 0.1$, $g_c = 0.2 e^{j60^\circ}$, $g_u = 0.05 e^{j60^\circ}$ 时,理想和互耦条件下,改善因子与干扰入射角的关系曲线。此时,阵列互耦对滤波改善因子影响随两者的入射角差异不同而变化,最大下降量可达 2.5dB 左右。

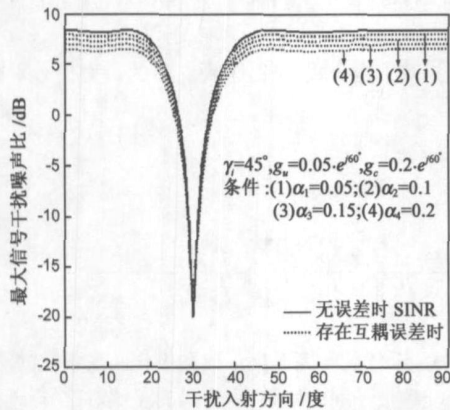


图2 极化敏感阵列的滤波性能与互耦误差的关系

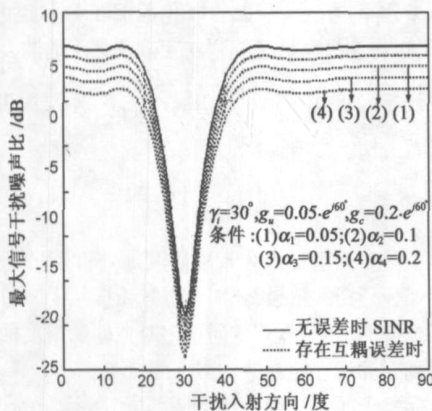


图3 极化敏感阵列的滤波性能与互耦误差的关系

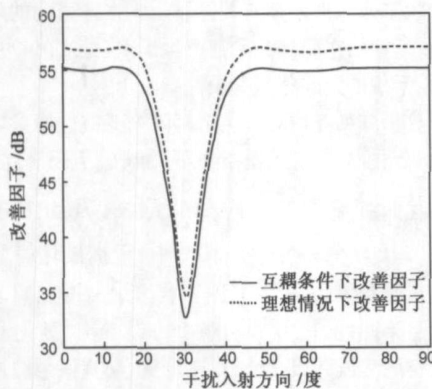


图4 理想和互耦条件下,改善因子与干扰入射方向角的关系

5 结论

导致极化敏感阵列误差的因素很多,主要有阵列互耦和通道不一致性.本文在考虑阵列互耦情况下,给出阵列互耦的数学模型,并把互耦误差分解为信号极化信息误差和空间信息误差.利用此模型分析了阵列互耦对极化敏感阵列滤波性能的影响.另外,通道间的不一致性本文未加考虑,阵列互耦及通道失配对空域-极化域联合谱估计精度的影响还有待于作进一步分析.

参考文献:

- [1] 徐振海,等.极化敏感阵列信号处理的研究[D].长沙:国防科技大学,2004.
- [2] Jian Li. Angle and polarization estimation using ESPRIT with polarization sensitive array [J]. Trans Antennas Propagation IEEE,1991,39(9):1376-1383.
- [3] 徐振海,等.极化敏感阵列滤波性能分析[J].电子学报,2004,32(8):1130-1134.
Xu Zhen-hai, et al. Filtering performance of polarization sensitive array: Completely polarized case [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(8): 1130-1134. (in Chinese)
- [4] Inder J Gupta. Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays [J]. Trans Antennas Propagation IEEE, 1983, 31(5): 785-791.
- [5] X Li. Channel coupling in orthogonal polarization diversity systems and its influence on diversity gain [J]. Electronics Letters, 2005, 41(5): 225-226.
- [6] A Manikas, N Fistas. Modeling and estimation of mutual coupling between array elements [A]. Proceedings of IEEE. ICASSP'94 [C]. Adelaide, Australie: IEEE Press, 1994. Vol. 4. 553-557.
- [7] Wang Buhong. Robust DOA estimation and array calibration in the presence of mutual coupling for uniform linear array [J]. Science in China, 2004, 47(3): 348-361.
- [8] Salman Durrani. Effect of mutual coupling on the interference rejection capabilities of linear and circular arrays in CDMA systems [J]. Trans Antennas Propagation IEEE, 2004, 52(4): 1130-1134.
- [9] 孙长果,等.考虑互耦影响下的智能天线数字波束赋形[J].微波学报,2003,39(4):30-33.
Sun Chang-guo, et al. Digital beam forming of smart antenna with mutual coupling [J]. Journal of Microwaves, 2003, 39(4): 30-33. (in Chinese)
- [10] Parker. Phased Arrays-Part 1: Theory and architectures [J]. Trans Microwave, 2002, 50(3): 678-687.
- [11] 杨超,等.空间谱估计测向中通道失配与阵元间互耦的一次性补偿[J].电子科学学刊,1995,17(2):206-209.
Yang Chao, et al. Simultaneous compensation for channel mismatching and mutual coupling in spatial estimation [J]. Journal of Electronics, 1995, 17(2): 206-209. (in Chinese)

作者简介:

刘勇男,1981年4月生于山东省济南市,现为国防科技大学硕士研究生.2004年在山东理工大学电气与电子工程学院获学士学位,同年考入国防科技大学攻读硕士学位.研究方向为:雷达极化信息处理,雷达电子对抗.

E-mail: passerinrain@sohu.com