

有源非同相多通道接收系统噪声系数测试研究

林晨晨,李光廷,张欣,聂世康,陈一波

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710100)

摘要:传统的噪声系数级联公式仅适用于二端口网络。文中针对非等幅同相叠加的有源多通道接收系统建立了普适的模型,并推导出相应的噪声系数计算公式。在此基础上,对利用二端口测试设备进行多端口系统噪声系数测试的三种方法(增益法、支路法和功分法)的基本原理进行了推导,并在操作复杂度、测试误差等方面进行了对比分析,最后通过仿真实验验证了计算公式和测试方法的准确性,为系统设计阶段的方向图设计和系统链路指标分配提供了理论支持,为系统测试提供了参考。

关键词:非等幅同相;多通道;噪声系数;测试

中图分类号:TN958 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2020)09-0075-05

引用格式:林晨晨,李光廷,张欣,等.有源非同相多通道接收系统噪声系数测试研究[J].现代雷达,2020,42(9):75-79.

LIN Chenchen, LI Guangting, ZHANG Xin, et al. A study on noise figure measurements of active multi-channel receive system with unequal phase superposition[J]. Modern Radar, 2020, 42(9): 75-79.

A Study on Noise Figure Measurements of Active Multi-channel Receive System with Unequal Phase Superposition

LIN Chenchen, LI Guangting, ZHANG Xin, NIE Shikang, CHEN Yibo

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract:The traditional noise figure cascading formula is only applicable to two-port network. Focusing on the active multi-channel receive system with unequal amplitude and phase superposition, a universal model is established and corresponding theoretical formula is derived. On this basis, the rationales of three test methods, which employ two-port test equipment to complete the noise figure measurement of multi-port network, has been deduced including the gain method, the branch method and the power divider method. Then comparative analysis is made in terms of operation complexity and test error, and the accuracy of the proposed theoretical formula and test approach is verified by simulation afterwards. This article will provide theoretical support for antenna pattern optimization and system link indicators allocation during system design, also a useful reference for system testing.

Key words:unequal amplitude and phase; multi-channel; noise figure; testing

0 引言

以相控阵和数字馈源反射面天线为代表的有源多通道系统,可通过调节各通道的移相衰减器形成灵活收发波束,在通信与雷达系统中具有良好的应用前景。对射频多通道接收系统而言,噪声系数可以表征由接收设备引入的热噪声分量,对系统整体的灵敏度和动态范围等指标具有较大影响,是系统的关键参数之一^[1]。

传统的噪声系数定义及测试方法仅适用于二端口网络,针对多入一出多端口接收网络的特点,国内外学者进行了广泛研究并积累了大量经验。文献[2-4]将二端口网络噪声系数的定义进行推广,分别给出了多端口网络的等效噪声温度和点频噪声系数的定义,并

在兼顾测试准确度和效率的原则下,根据通道数目的不同提出了几种测试方法,具有很高的参考价值;文献[5]和文献[6]分别提出当系统中有源支路增益远大于无源网络损耗时,合成网络噪声系数可以用有源支路噪声系数近似替代;文献[7]和文献[8]提出通过求解不同连接状态下联立的方程组,可用于测试多端口网络总噪声系数和其中单条通道的噪声系数;文献[9-10]重点推导了合路器和功分器在多端口网络噪声分析中的计算方法;文献[11]针对噪声系数较大的系统,提出利用网络中低噪声放大器的通断电代替Y因子法中的噪声头;有文献对双层^[12]、多层^[13]相控阵网络噪声系数进行推导,并分析了其对雷达系统总体设计的指导作用。

以上文献均假设合成网络入口处各通道信号为同相叠加,而实际系统中有时需要各通道信号非同相叠加以产生特定形状接收波束^[1,14]并评估相应工作状态下的系统噪声系数。针对这一问题,本文从噪声系

基金项目:国家自然科学基金项目(61701395)
通信作者:林晨晨 Email:morning0612@126.com
收稿日期:2020-05-10 修订日期:2020-07-08

数定义出发,推导了非同相叠加多通道网络噪声系数公式;从原理上对比了三类测试方法:增益法、支路法和功法;并通过仿真验证了上述公式和测试方法的准确性。

1 系统模型

图1上部为一例经典的多通道接收系统组成框图,本文研究目的为获得虚线框内(不包含馈源)接收系统的噪声系数。该系统可等效为图1左下部所示的三级网络:

1) 合路器:根据文献[6,9]所述,某损耗为 L_{pc} ($L_{pc} \geq 1$) 的 $1:N$ 等功率合路器可以等效为由 N 个二端口元件与一个理想加法器组成的模型,其中各支路损耗 $L_{pc,n} = L_{pc}/N$,包括有功损耗 L_{pc} 和无功损耗 $1/N$ 两部分,如图1右下部所示。为便于分析计算,以下模型中将合路器的有功损耗部分归入合路器前段的各有源支路中。

2) 合路器前级的 N 条有源支路:由环行器、低噪声放大器、衰减器、移相器以及合路器的有功损耗组成,第 n 条有源支路的噪声系数、增益及相对第1条支路的插入相位分别记为 $F_n, G_n, \phi_n, n=1,2,\dots,N$ 。

3) 合路器后级器件:合路器后端所有器件可等效为噪声系数为 F_{post} ,增益为 G_{post} 的二端口模块。

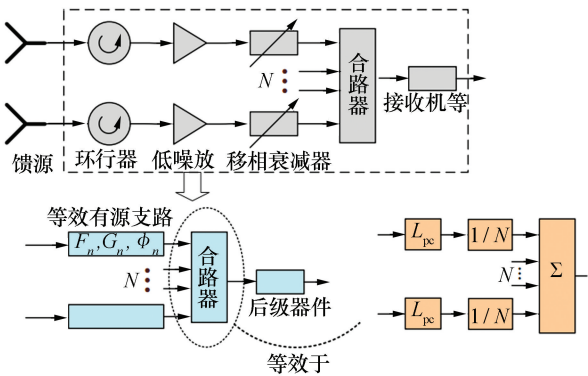


图1 有源多通道接收系统典型组成框图

下面对该系统噪声系数公式进行推导。不失一般性,假设系统中各器件的带宽随信号流向逐级递减^[15-16]。记系统输入信号、噪声功率分别为 S_{in}, N_{in} ,则各支路输入信号功率、噪声功率分别为 $S_{in}/N, N_{in}/N$;第 n 条有源支路出口的信号功率、噪声功率分别为 $S_{in}G_n/N$ 和 $N_{in}F_nG_n$ 。由于信号和噪声分别服从幅度相加和能量相加的不同法则,故合路器出口信号、噪声功率分别为

$$N_{mid} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N N_{in} F_n G_n, S_{mid} = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{S_{in}}{N}} \frac{1}{N} G_n e^{j\phi_n} \right|^2 \quad (1)$$

则由有源支路和合路器组成的前级系统的增益和噪声系数分别为

$$\begin{cases} G_{mid} = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{G_n} e^{j\phi_n} \right|^2 \\ F_{mid} = N \sum_{n=1}^N F_n \cdot G_n / \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{G_n} e^{j\phi_n} \right|^2 \end{cases} \quad (2)$$

根据噪声系数级联公式^[17],整个待测系统的噪声系数可记为

$$F_{总} = F_{mid} + (F_{post} - 1)/G_{mid} = \frac{N}{\left| \sum_{n=1}^N \sqrt{G_n} e^{j\phi_n} \right|^2} \left(\sum_{n=1}^N (F_n \cdot G_n) + F_{post} - 1 \right) \quad (3)$$

注意:本文中所涉及变量,除特殊说明外均为真值。

2 三种噪声系数测试方法

针对上节所述多通道接收系统,下面介绍三种利用实验室通用的二端口网络噪声系数测试仪进行噪声系数测试的方法,分别从理论推导、可操作性、误差等方面进行分析。

2.1 增益法

记输入信号、噪声功率分别为 S_{in}, N_{in} ,输出信号、噪声功率分别为 S_{out}, N_{out} 。根据噪声系数的定义

$$F = \frac{S_{in}/N_{in}}{S_{out}/N_{out}} = \frac{N_{out}}{N_{in}G} \quad (4)$$

可知,当系统信号增益 $G = S_{out}/S_{in}$ 精确可知时,考虑到

$$N_{in} = kT_0B \quad (5)$$

为已知量,只需测量系统输入端接 50Ω 匹配负载时的输出噪声功率谱密度 $P_{n,out}$,将 $N_{out} = P_{n,out} \cdot B$ 及式(5)代入式(4),得到 $F = P_{n,out}/(kT_0G)$,其中玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$,标准环境温度 $T_0 = 290 \text{ K}$ 。

该方法看似简单易行,然而测试时无法由实验室通用仪器直接测得多端口网络的信号增益,需借助功分器或者其他辅助测试方法进行转化;另外,当输出噪声功率谱密度较低时测量误差一般较大。下面介绍两种更为实用的测试方法。

2.2 支路法

支路法是指依次测量第 n 个输入端口至输出端口之间的二端口网络参数,然后计算得到整个接收网络噪声系数的方法。测试连接关系如图2a)所示:假设信号由第 n 路输入,其余 $N-1$ 路输入端接 50Ω 匹配负载,所有低噪声放大器为开机状态,此时测量得的第

n 路噪声系数和增益分别为

$$G_{支n} = G_n G_{post} / N, F_{支n} = N_{out} / (N_{in} G_{支n}) \quad (6)$$

下面分析单支路信号输入(即测试状态)与全支路信号输入(即实际工作状态)的区别。测试状态下噪声与信号的传输路径参见图 2 a),即信号仅经过单条支路,而噪声为所有支路共同合成。实际工作状态下的信号、噪声传输路径参见图 2 b),即二者均为所有支路共同合成的,各输入端的信号功率为 S_{in}/N ,噪声输入、输出功率与测试状态相同。

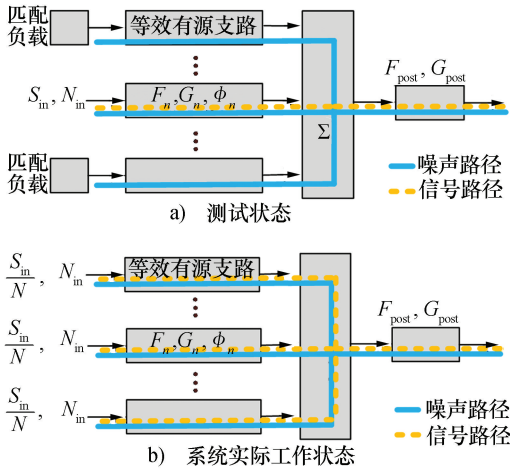


图 2 支路法连接关系示意图

因此,工作状态下系统真正的增益和噪声系数分别为

$$G_{总} = \frac{S_{out}}{S_{in}} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{S_{in}}{N}} \cdot \frac{G_n}{N} e^{j\phi_n} \right|^2 G_{post}}{S_{in}} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \sqrt{G_n} e^{j\phi_n} \right|^2}{N^2} \cdot G_{post} \quad (7)$$

$$F_{总} = \frac{N_{out}}{N_{in}} \cdot \frac{1}{G_{总}} \quad (8)$$

联立式(6)、式(7)、式(8)可得

$$\begin{cases} G_{总} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \sqrt{G_{支n}} e^{j\phi_n} \right|^2}{N} \\ F_{总} = \frac{N}{\left| \sum_{n=1}^N (e^{j\phi_n} / \sqrt{F_{支n}}) \right|^2} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知,根据全部 N 路增益、噪声系数的测量值即可推算出系统实际的增益和噪声系数。该方法的优点是可测得各支路的具体性能,适于配合其他测试方法相互验证使用。

2.3 功分法

对于 N 较大的系统,支路法由于需要频繁更换连线导致测试效率很低,此时可使用功分法提高效率。由于实际测试时难以寻找功分路数 M 与待测系统通道数 N 完全一致的功分器,下文通过推导证明了只要满足 $M \geq N$ 即可。在被测系统前端接入 $1:M$ 功分器,其中 N 个输出端口与被测系统入口相连,多余的 $M-N$ 个输出端口连接 50Ω 匹配负载,可参考图 3 c)中的仿真电路连接关系。功分器输入端信号功率记为 S_{in} ,可由仪器读出包括功分器在内的整个接收系统噪声系数 $\hat{F}_{总}$ 。

下面对 $\hat{F}_{总}$ 与实际待测系统噪声系数 $F_{总}$ (即式(3))之间关系进行推导。

记功分器的有功损耗为 L_{pd} ,各有源支路入口的信号功率为 $S_{in}/(ML_{pd})$,易得合路器输出端信号功率和信号增益分别为

$$\begin{cases} \hat{S}_{mid} = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{S_{in}}{ML_{pd}N}} e^{j\phi_n} \right|^2 = \frac{S_{in}}{NML_{pd}} \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{G_n} e^{j\phi_n} \right|^2 \\ \hat{G}_{mid} = \frac{1}{NML_{pd}} \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{G_n} e^{j\phi_n} \right|^2 = \frac{N}{ML_{pd}} G_{mid} \end{cases} \quad (10)$$

下面分析噪声功率变化:由于功分器连接在整个系统的最前端, N 个出口之间噪声波形相互独立^[18],功率均为 N_{in} ,故合路器出口的噪声功率表达式与式(1)中 N_{mid} 相同。因此合路器出口的噪声系数可记为

$$\hat{F}_{mid} = \frac{N_{mid}}{N_{in} \hat{G}_{mid}} = \frac{ML_{pd}}{N} F_{mid} \quad (11)$$

将上式与后级器件参数一起代入级联公式,可得包含功分器的整个系统噪声系数为

$$\hat{F}_{总} = \hat{F}_{mid} + \frac{F_{post} - 1}{\hat{G}_{mid}} = \frac{ML_{pd}}{N} F_{总} \quad (12)$$

观察上式可知:噪声系数仪的测试结果 $\hat{F}_{总}$ 除以功分器的有功损耗 L_{pd} 、功分器与合路器路数之比 M/N 就得到了被测系统的噪声系数,即 $F_{总} = \hat{F}_{总} / L_{pd} / (M/N)$ 。以上证明了功分法由测试值向真实值的折算过程与各通道的移相值无关,是上述三种方法中最为简便易行的测试方法。

3 仿真分析与实验验证

下面通过 ADS 软件的谐波平衡模式和 Matlab 软件对上节三种测试方法进行仿真验证,相应的电路原

理图如图 3 所示。

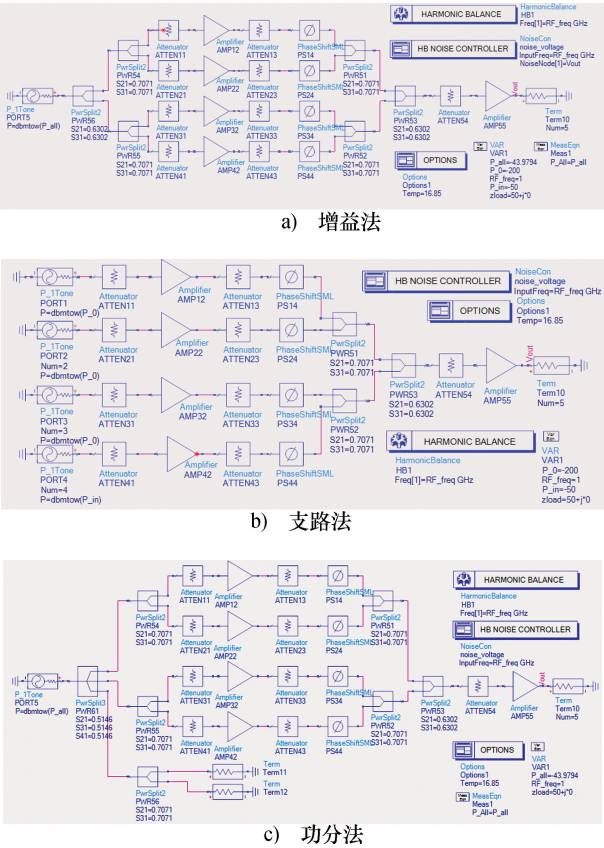


图 3 ADS 仿真电路图

测试结果见表 1。被测部分为四通道幅相加权接收系统,各级器件参数见表 1,ADS 仿真中均使用库内理想器件。系统温度为 16.86℃,仿真频点为 1 GHz,带宽为 1 Hz。

表 1 四通道接收系统各级器件参数

器件	增益/dB	噪声系数/dB
环形器及线缆	-1	1
低噪声放大器 1	30	1.3
移相衰减器	$-[3,8,1,0]$ 移相值 $= [1,35,0,7]^{\circ}$	$[3,8,1,0]$
合路器有功损耗	-1	1
无源器件	-0.5	0.5
接收机	60	5.9

(1) 增益法

按照上节所述,仿真电路里在被测系统前增加了有功损耗为 1 dB 的 1:4 功分器,测得整个系统信号增益为 83.83 dB,则待测系统信号增益为 84.83 dB,测得 V_{out} 处噪声电压为10.86 μ V,即输出噪声功率为-116.27 dB,输入噪声功率为标准值-203.98 dB,代入式(4)得到待测系统噪声系数为 2.88 dB。

(2) 支路法

如图 3 b) 所示,依次将端口 1~4 设置为信号入口,端口 5 设置为出口,其余端口连接 50 Ω 匹配负载

(仿真中也可将信号源功率设置为极低),所有低噪声放大器处于工作状态。测得四个二端口噪声系数为 [9.22 14.22 7.22 6.22] dB,代入式(9),可得待测系统总噪声系数为 2.87 dB。

(3) 功分法

如图 3 c) 所示,待测系统前端连接有功损耗为 1 dB 的 1:6 等功分器,剩余的 2 个输出口连接匹配负载。测得 $F_{总}=5.64$ dB,代入式(12),得到待测系统噪声系数为 2.88 dB。

最后,使用 Matlab 软件将系统各器件参数代入式(3),计算结果为 2.8774 dB,与 ADS 的三种仿真结果完全吻合,证明了本文所述三种测试方法的有效性。

另外,考虑到系统设计时,常需权衡使用幅度相位加权对方向图的优化作用以及对链路增益的影响程度。因此,这里根据式(3)以四通道相位加权为例,使用 Matlab 仿真了理想情况下相位权值对噪声系数的影响,统计结果以箱式图形式展示于图 4 中。以横轴上 60°对应的箱子为例:取 1 000 组在[0°, 60°]区间内服从均匀分布的随机数做为相位加权值,计算相应待测系统的噪声系数并分析其统计特征。图中自下向上数值的含义为最小值 2.71 dB,1/4 分位数 2.85 dB,中位数 2.96 dB,3/4 分位数 3.12 dB,最大值 3.52 dB。由图可大致看出系统噪声系数随着相位权值离散性的增大而逐步恶化。系统设计时,可初步划定相位权值范围后进行方向图优化设计,然后将幅相权值代入公式分析对系统链路指标的影响,最终确定设计方案。

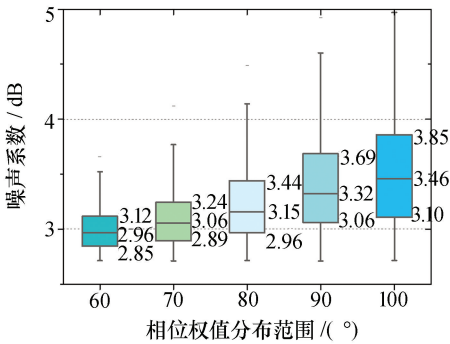


图 4 相位加权离散程度对噪声系数的影响

4 结束语

本文推导了非等幅同相叠加的有源多通道接收系统噪声系数计算公式,可为系统设计阶段的方向图设计与系统链路指标分配提供参考。在此公式基础上,推导并对比了利用实验室常见测试设备进行多端口网络噪声系数测试的三种方法,并使用 ADS 仿真软件对上述公式和测试方法的有效性进行了验证。实际测试中可根据被测系统特点在三种方法中进行选择:增益法操作最简单,适合测试噪声系数较高的系统;功分法

操作相对简单,且在噪声系数较低时可保持较小的测试误差;支路法操作和计算较为复杂,但能反映出各支路的具体性能。另外,在条件允许的情况下,可使用多种方法交叉验证,提高测试准确性。

参考文献

- [1] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1994.
ZHANG Guangyi. Phased array radar system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994.
- [2] LEE J J. G/T and noise figure of active array antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(2): 241-244.
- [3] 黄川东. 相控阵雷达接收系统有效噪声温度的测试[C]//全国微波测量会议. 北京:中国电子学会,2000: 55-59.
HUANG Chuandong. Effective noise temperature measurement of receive system in phased array radar[C]// National Microwave Measurement Conference. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2000: 55-59.
- [4] 顾墨琳,林守远. 有源相控阵接收系统的噪声测试[J]. 现代雷达, 2004, 26(3): 4-57.
GU Molin, LIN Shouyuan. Noise temperature measurements of active phased array receiving system[J]. Modern Radar, 2004, 26(3): 4-57.
- [5] 于洪标. 相控阵雷达中多端口网络的噪声特性分析[J]. 微波学报, 2009, 25(2): 58-61.
YU Hongbiao. Noise characteristic analysis of multi-port network in phased array radar[J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(2): 58-61.
- [6] 郭文刚,郝洪杰. 阵列系统中多端口网络噪声系数测试分析[J]. 无线电工程, 2011, 41(3): 59-61.
GUO Wengang, XI Hongjie. Noise figure test and analysis of multi-port network in array system[J]. Radio Engineering, 2011, 41(3): 59-61.
- [7] 蒙国站,王世辉,陈立翔. 多端口网络噪声系数测试方法[J]. 微波学报, 2012, 28(4): 43-47.
MENG Guozhan, WANG Shihui, CHEN Lixiang. Noise figure measurement of multi-port network[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(4): 43-47.
- [8] 杨顺平,杜 艳,周太富. 多端口 T/R 组件的单通道噪声系数测试方法[J]. 电讯技术, 2016, 56(10): 1170-1173.
YANG Shunping, DU Yan, ZHOU Taifu. A single-channel noise figure measurement method for multi-port T/R modules[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(10): 1170-1173.
- [9] GATTI R V, DIONIGI M, SORRENTINO R. Computation of gain, noise figure, and third-order Intercept of active array antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2004, 52(11): 3139-3142.
- [10] 李维梅,刘 波,王旭艳. 相控阵雷达接收系统噪声系数分析与测试验证[J]. 现代雷达, 2016, 38(10): 69-73.
LI Weimei, LIU Bo, WANG Xuyan. Analysis and measurement of noise figure in phased array radar receiving system[J]. Modern Radar, 2016, 38(10): 69-73.
- [11] 吴鸣鸣,张钦宇,路雪莲. 多通道射频接收机测量噪声系数的新方法[J]. 现代电子技术, 2008, 14: 139-141.
WU Mingmin, ZHANG Qinyu, LU Xuelian. New method of noise figure measurement for multi-channel RF receiver[J]. Modern Electronics Technique, 2008, 14: 139-141.
- [12] 高 兵,杨丽丽. 相控阵噪声系数特性及其典型应用分析[J]. 现代雷达, 2014, 36(4): 14-18.
GAO Bing, YANG Lili. Noise factor characteristic analysis of phased array with its representative application[J]. Modern Radar, 2014, 36(4): 14-18.
- [13] 赵旭昊. 相控阵天线多通道并联噪声系数分析[J]. 现代雷达, 2015, 37(3): 55-62.
ZHAO Xuhao. Noise figure analyses of parallel multi-channels in phased array antenna radar[J]. Modern Radar, 2015, 37(3): 55-62.
- [14] 周治宇,田 华,陈 豪. 基于卫星反射面天线的数字波束形成技术[C]//2009年全国微波毫米波会议论文集. 西安:中国电子学会,2009: 525-1528.
ZHOU Zhiyu, TIAN Hua, CHEN Hao. Digital beamforming technology based on satellite reflector antennas[C]// National Conference on Microwave and Millimeter wave. Xi'an: Chinese Institute of Electronics, 2009: 525-1528.
- [15] 雷振亚,梁昌洪. 不等带宽两端口网络级联的噪声系数[J]. 西安电子科技大学学报, 1994, 21(3): 272-277.
LEI Zhenya, LIANG Changhong. Noise figure of two-port cascade network with unequal bandwidth[J]. Journal of Xidian University, 1994, 21(3): 272-277.
- [16] FRIIS H T. Noise figures of radio receivers[J]. Proceedings of the IRE, 1944, 32(7): 419-422.
- [17] WEDGE S W, RUTLEDGE D B. Noise waves and passive linear multiports[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1991, 1(5): 117-119.

作者简介:

林晨晨 女,1991年生,博士,工程师,研究方向为 SAR 总体技术;

李光廷 男,1983年生,博士,高级工程师,研究方向为卫星有效载荷总体技术;

张 欣 男,1987年生,博士,工程师,研究方向为 SAR 信号处理技术;

聂世康 男,1988年生,硕士,工程师,研究方向为 SAR 总体技术;

陈一波 男,1988年生,本科,工程师,研究方向为卫星有效载荷测试技术。