

档 号 _____

编 号 _____

保管期限 _____

密 级 _____

阶段标记 _____

名称: 4B1L1 抗干扰天线系统测试报告

会 签

型号: SHJJKGR-B1L1-1910

编 写 相 佳 强

校 对 陈 伟 东

审 核 汪 成 庆

批 准 薛 玉 磊

上海卷积通讯技术有限公司

2022年1月28日

1 概述

本模块为 BDS/GPS 双模卫星接收模块，采用 4 阵元 BDS/GPS 抗干扰体制，能对抗来自不大于三方向的压制式干扰，模块主要由下变频通道部分、抗干扰处理部分和上变频通道部分组成。

本文档主要描述模块测试情况。

2 主要功能及性能指标

2.1 主要功能

模块主要功能包括：

- a) 具备抵抗 BDS B1 和 GPS L1 频点卫星信号抗干扰的能力；
- b) 在线软件升级功能。

2.2 主要性能指标（接北三接收机）

- a) 工作频率及带宽：BDS：（ $1561.098 \pm 2.046\text{MHz}$ ）；
GPS：（ $1575.42 \pm 1.023\text{MHz}$ ）；
- b) 输出驻波比： ≤ 2.0 ；
- c) 天线信号输入阵元数：4；
- d) 抗干扰数据更新速率：1Hz；
- e) 抗干扰性能指标要求
 - (1) 抗干扰体制：BDS/GPS 抗干扰体制；
 - (1) 抗干扰类型：连续波干扰、宽带噪声干扰和多点扫频干扰等；
 - (1) 抗宽带干扰带宽： $\geq 2\text{MHz}$ （B1 和 L1 频段）；
 - (1) 抗干扰源个数：同时抗 1~3 个不同方向干扰源；
 - (1) 抗单干扰能力：

干信比 $\geq 105\text{dB}$ (当天线间距 $\lambda/2$ 时);

干信比 $\geq 80\text{dB}$ (当天线间距 $\lambda/4$ 时);

(1) 抗多干扰能力:

干信比 $\geq 95\text{dB}$ (当天线间距 $\lambda/2$ 时);

干信比 $\geq 70\text{dB}$ (当天线间距 $\lambda/4$ 时)

; f) 供电及功耗:

工作电压: DC $5\text{V} \pm 0.25\text{V}$;

功 耗: $\leq 7\text{W}$;

g) 重量: $\leq 130\text{g}$;

h) 尺寸: $\leq 100\text{mm} \times 55\text{mm} \times 16\text{mm}$;

i) 通信接口: RS422 全双工, 波特率 115200bps, 1 位起始位, 1 位停止位, 8 位数据位, 无校验;

3 测试设备

本试验需要在室内/外进行, 需要的具体试验设备配套参见表 1。

表 1 试验设备配套表

序号	设备名称	数量	备注
1	抗干扰天线阵列	1 套	L1/B1 频点, 间距可调
2	北斗导航接收机	1 套	B1、L1 频点
3	干扰源 (含辐射天线)	3 套	B1、L1 频点
4	阵列低噪放	1 套	B1、L1 频点
5	频谱仪	1 台	标定干扰功率
6	标准接收天线	1 个	标定干扰功率
7	射频线缆	若干	
8	电源	1 台	供电
9	游标卡尺	1 个	
10	电子秤	1 台	
11	矢量网络分析仪	1 台	

4 测试流程

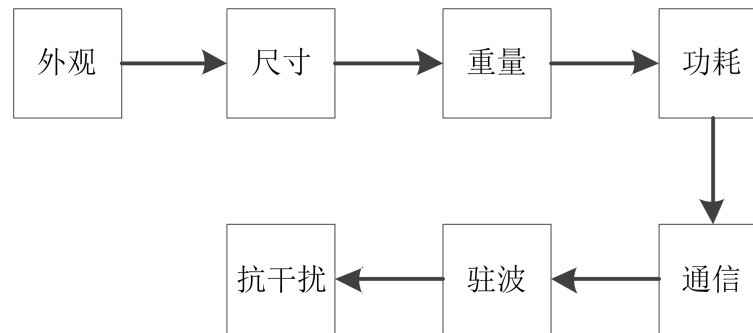


图 1 测试流程

测试流程如图 1 所示，包括室内测试和室外测试两部分，其中室内测试项包括外观、尺寸、重量、功耗、通信和驻波测试；室外测试包括抗干扰测试。

5 测试方法

5.1 室内测试

5.1.1 外观

目视检查产品外观质量，模块的产品标识应准确，表面清洁，无划痕、毛刺，金属件应无锈蚀，涂镀层完好、无剥落，紧固件、连接件牢固，电连接器完整无损。

5.1.2 外形尺寸

使用游标卡尺测量产品的外形尺寸，外形尺寸不得超过 $100\text{mm} \times 55\text{mm} \times 16\text{mm}$ 。

5.1.3 重量

使用电子秤测量产品重量，产品重量不得超过 220g 。

5.1.4 功耗

调整直流电压源输出电压为 5V ，连接电缆后给模块上电，测试

模块功耗，模块功耗不得超过 7W。

5.1.5 通信

通过串口线和 422 转接头连接通信端口，给模块上电，打开串口调试工具，设置波特率为 115200bps，1 位起始位，1 位结束位，8 位数据位，无校验位，观察模块通信是否正常。

5.1.6 驻波

设置矢网中心频点为 1567.5MHz，带宽设置为 50MHz，设置 Mark 点分别为 1561.098MHz 和 1575.42MHz，校准矢网，分别测试四个输入端口和一个输出端口的驻波。驻波比不应超过 2。

5.1.7 室内测试结果



图 2 4B1/L1 卫星导航抗干扰模块实物

表 2 室内测试结果

序号	测试项目	测试结果		结论
1	外观	正常		■合格 □不合格
2	尺寸	长	99.96mm	■合格 □不合格
		宽	54.97mm	■合格 □不合格
		高	15.94mm	■合格 □不合格
3	重量	127g		■合格 □不合格

序号	测试项目	测试结果		结论
4	功耗	6.1W@5V		■合格 □不合格
5	通信	正常		■合格 □不合格
6	输入驻波	XS1	1.09	■合格 □不合格
		XS2	1.06	■合格 □不合格
		XS3	1.07	■合格 □不合格
		XS4	1.07	■合格 □不合格
7	输出驻波	XS5	1.85	■合格 □不合格

5.1.8 结论

由表 2 可以看出，该 4B1L1 抗干扰模块的外观、尺寸、重量、功耗、通信、驻波等指标均满足任务书要求。

5.2 室外测试

5.2.1 干扰设置

抗干扰类型：B1 和 L1 频点宽带噪声和扫频干扰；

抗干扰带宽：B1 频点为 4MHz，L1 频点为 2MHz。

5.2.2 测试环境

干扰测试场地如图 3 所示。

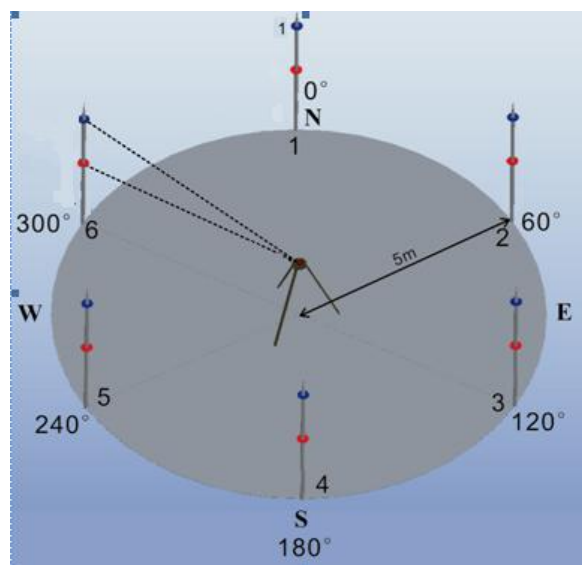


图 3 干扰测试场景

测试场地如图 3 所示，干扰发射天线与卫星抗干扰天线间距为 5m 时，满足远场条件。距离设定为 5m，干扰发射天线相对于卫星抗干扰天线仰角均不小于 5° 及不同的方位夹角。

5.2.3 干扰场景

按照 5.2.2 测试环境设置干扰场景。单干扰场景设置如下表 3 所示，共 2 个场景。三干扰场景设置为如表 4 所示，共 2 个场景。即抗干扰测试共设置 6 个场景，仰角统一设置为 5°。

表 3 单干扰源场景测试

场景	干扰位置	干扰模式
场景 1	4	宽带噪声
场景 2	4	扫频干扰

表 4 三干扰场景设置

场景	干扰源 1		干扰源 2		干扰源 3	
	干扰位置	干扰类型	干扰位置	干扰类型	干扰位置	干扰类型
场景 3	2	宽带噪声	4	宽带噪声	6	宽带噪声
场景 4	2	扫频干扰	4	扫频干扰	6	扫频干扰

5.2.4 干扰源标定

空间北斗卫星信号的功率以 -133dBm 作为计算依据，在实际干扰场景标定中要对三个仰角的发射天线进行标定，将标准增益天线放到产品阵面上严格对准发射天线进行接收，用频谱分析仪测试实际到达天线面的功率（按照宽带进行标定，使用最大保持进行功率测试），然后根据下述公式计算出对应的干信比。

干信比计算公式：干信比 = 到达天线面的干扰功率 - (-133dBm)。

5.2.5 试验方法

a) 安装并初始检验

将抗干扰模块、低噪放及天线阵列固定安装在高程、位置已标定好的位置点，并设置天线阵列间距为 $\lambda/2$ ，然后正确连接测试设备及接收机，进行加电测试，通过 PC 机测试软件观察收星定位情况，确定接收机正常收星定位。

b) 干扰设置

在单干扰情况下，设置不同场景下对应发射机的功率值，使其到达接收设备对应的 B1 频点干扰功率为 105dB。

在三干扰情况下，设置不同场景下对应发射机的功率值，使其到达接收设备对应的 B1 频点干扰功率为 95dB。

c) 施加干扰

分别施加单干扰和三干扰，观察接收机 B1 频点定位情况，若能收星定位，则逐步以 5dB 量值增加，直至无法定位，测试抗干扰能力上限。

d) 改变干扰频点

改变干扰频点为 L1 频点，重复 b)、c)，观察接收机 L1 频点定位情况。

e) 改变阵元间距为 $\lambda/4$

设置阵元间距为 $\lambda/4$ ，对应单三干扰量值分别为 70dB 和 55dB，重复步骤 a)、b)、c)、d)，测试抗干扰能力。

f) 改变阵元间距为 $\lambda/8$

设置阵元间距为 $\lambda / 8$, 对其施加一定的干扰值, 重复步骤 a)、b)、c)、d), 测试收星与抗干扰能力。

5.2.6 测试结果

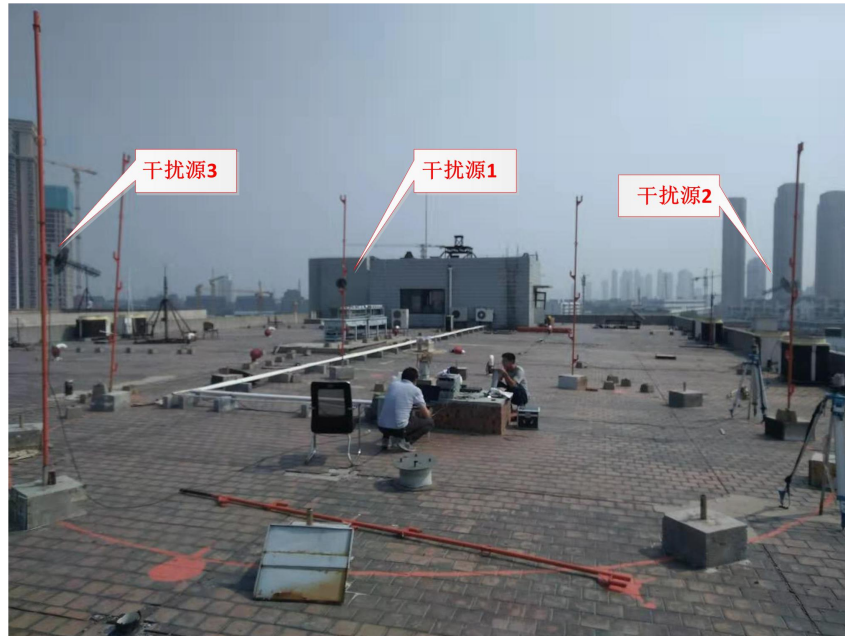


图 4 室外抗干扰测试照片

5.2.6.1 $\lambda / 2$ 测试结果

测试用半波长阵面如图 5 所示。



图 5 测试用半波长阵面

静态收星效果如图 6 所示，其中 GPS L1 收星 10 颗；BDS B1 收星 11 颗。

GPS_L1(10,8)						BD2_B1(11,9)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	3	328	44	其它错误	83	1	37	146	43	正常	89
10	75	214	46	正常	88	3	43	190	42	正常	87
12	41	80	45	正常	87	4	90	0	37	星历不完整	1
14	30	292	40	正常	81	6	73	26	41	正常	89
18	12	308	43	卫星不健康	86	7	36	170	40	正常	87
20	47	170	44	正常	89	9	59	312	42	正常	89
24	30	50	41	正常	87	14	89	298	40	正常	88
25	42	144	43	正常	80	16	90	0	38	星历不完整	20
31	23	236	39	正常	79	21	10	132	40	正常	65
32	54	312	46	正常	83	24	72	198	47	正常	62
						26	51	50	45	正常	70

图 6 静态收星

首先施加 B1 频段干扰，测试结果如下图所示。

GPS_L1(10,8)						BD2_B1(11,11)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	6	324	41	正常	99	1	37	146	39	正常	203
10	70	200	44	正常	203	3	43	190	37	正常	202
12	40	72	46	正常	202	4	26	124	33	正常	24
14	34	296	38	其它错误	195	6	73	32	44	正常	202
18	12	302	44	卫星不健康	201	9	60	314	40	正常	202
20	40	170	42	正常	203	13	11	214	37	正常	148
24	24	52	38	正常	78	14	84	160	42	正常	203
25	47	138	42	正常	195	16	73	8	43	正常	134
31	26	240	42	正常	194	24	78	198	45	正常	181
32	58	318	48	正常	197	25	23	222	41	正常	170
						26	46	48	46	正常	8

图 7 单宽带 105dB 测试结果

GPS_L1(9,7)						BD2_B1(10,10)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	5	324	37	正常	16	1	37	146	36	正常	120
10	70	202	45	其它错误	120	3	43	190	31	正常	119
12	40	72	46	正常	119	6	73	32	42	正常	119
14	34	296	38	正常	112	9	60	314	35	正常	119
18	12	302	44	卫星不健康	118	13	11	214	34	正常	65
20	41	170	40	正常	120	14	85	160	37	正常	120
25	46	138	41	正常	112	16	73	8	39	正常	51
31	27	238	43	正常	111	24	78	198	41	正常	98
32	58	318	48	正常	114	25	22	222	40	正常	87
						26	46	48	46	正常	103

图 8 三宽带 80dB 测试结果

GPS_L1(10,8)						BD2_B1(11,11)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	6	324	41	正常	99	1	37	146	39	正常	203
10	70	200	44	正常	203	3	43	190	37	正常	202
12	40	72	46	正常	202	4	26	124	33	正常	24
14	34	296	38	其它错误	195	6	73	32	44	正常	202
18	12	302	44	卫星不健康	201	9	60	314	40	正常	202
20	40	170	42	正常	203	13	11	214	37	正常	148
24	24	52	38	正常	78	14	84	160	42	正常	203
25	47	138	42	正常	195	16	73	8	43	正常	134
31	28	240	42	正常	194	24	78	198	45	正常	181
32	58	318	48	正常	197	25	23	222	41	正常	170
						26	46	48	46	正常	8

图 9 单扫频 90dB 测试结果

GPS_L1(8,6)						BD2_B1(9,9)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
10	71	202	40	正常	50	1	37	146	42	正常	50
12	40	72	43	正常	49	3	43	190	38	正常	49
14	34	296	35	正常	42	4	26	124	39	正常	46
18	90	0	41	卫星不健康	48	6	73	30	37	正常	49
20	42	170	39	正常	50	9	60	314	33	正常	49
25	46	138	38	其它错误	42	14	85	160	41	正常	50
31	27	238	39	正常	41	24	77	198	43	正常	28
32	58	318	45	正常	44	25	22	222	46	正常	17
						26	46	48	34	正常	33

图 10 三扫频 80dB 测试结果

其次施加 L1 频段干扰，测试结果如下图所示。

GPS_L1(8,7)						BD2_B1(12,12)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	6	322	31	正常	291	1	37	146	42	正常	395
10	68	198	43	正常	395	3	43	190	39	正常	394
12	40	70	39	正常	394	4	26	124	37	正常	216
14	35	298	38	正常	7	6	73	34	44	正常	394
18	12	300	38	卫星不健康	7	7	40	172	38	正常	57
25	48	136	32	正常	387	9	60	316	41	正常	394
31	29	240	41	正常	388	13	10	212	33	正常	340
32	60	320	44	正常	389	14	82	160	42	正常	395
						16	73	10	40	正常	326
						24	80	198	45	正常	373
						25	24	224	39	正常	362
						26	44	48	44	正常	200

图 11 单宽带 90dB 测试结果

GPS_L1(8,7)						BD2_B1(12,12)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	6	322	33	正常	248	1	37	146	43	正常	352
10	68	198	44	正常	352	3	43	190	41	正常	351
12	40	70	45	正常	351	4	26	124	38	正常	173
18	12	300	31	卫星不健康	350	6	73	32	43	正常	351
24	23	54	40	正常	227	7	40	172	40	正常	14
25	48	136	35	正常	344	9	60	316	41	正常	351
31	29	240	41	正常	343	13	11	212	34	正常	297
32	59	320	44	正常	345	14	63	160	42	正常	352
						16	73	10	40	正常	283
						24	79	198	45	正常	330
						25	23	224	36	正常	319
						26	45	48	44	正常	157

图 12 三宽带 80dB 测试结果

GPS_L1(8,5)						BD2_B1(12,12)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
10	68	198	44	正常	440	1	37	146	43	正常	440
12	40	68	46	正常	439	3	43	190	41	正常	439
14	36	298	41	预差过大	52	4	26	124	38	正常	261
18	12	300	39	卫星不健康	52	6	73	34	44	正常	439
24	23	54	38	正常	8	7	40	172	39	正常	102
25	49	136	40	其它错误	10	9	60	316	41	正常	439
31	30	240	47	正常	431	13	10	212	34	正常	365
32	60	322	47	正常	434	14	62	160	42	正常	440
						16	73	10	40	正常	371
						24	80	198	45	正常	418
						25	24	224	40	正常	407
						26	44	48	44	正常	245

图 13 单扫频 90dB 测试结果

GPS_L1(7,6)						BD2_B1(11,11)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	6	322	37	正常	56	1	37	146	42	正常	60
10	67	196	41	正常	63	3	43	190	41	正常	59
12	40	68	37	正常	58	4	26	124	38	正常	44
20	38	170	36	正常	60	6	73	34	42	正常	61
25	49	134	44	正常	54	7	41	172	39	正常	58
31	30	242	47	其它错误	51	9	60	316	40	正常	58
32	60	322	36	正常	52	14	81	160	42	正常	61
						16	73	12	38	正常	36
						24	81	198	44	正常	36
						25	25	224	42	正常	31
						26	43	48	43	正常	42

图 14 三扫频 80dB 测试结果

5.2.6.2 $\lambda/4$ 测试结果

测试用 $\lambda/4$ 波长阵面如图 19 所示。



图 15 测试用 $\lambda/4$ 波长阵面

静态收星效果如图 20 所示，其中 GPS L1 收星 10 颗；BDS B1 收星 9 颗。

GPS_L1(10,7)						BD2_B1(9,9)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	312	45	正常	34	1	37	146	40	正常	32
10	57	188	39	正常	34	2	33	226	39	正常	30
12	36	56	46	其它错误	34	3	43	190	41	正常	33
14	43	306	43	正常	34	4	26	124	40	正常	32
18	90	0	43	卫星不健康	33	7	45	176	42	正常	34
20	28	170	40	正常	33	10	24	196	37	正常	33
22	2	322	40	仰角太低	31	14	72	162	39	正常	33
25	56	120	41	正常	33	25	32	230	44	正常	33
31	38	250	44	正常	34	26	35	48	43	正常	34
32	66	338	42	正常	34						

图 16 静态收星

首先施加 B1 频段干扰，测试结果如下图所示。

GPS_L1(11,9)						BD2_B1(12,11)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	304	39	残差过大	356	2	33	226	40	正常	877
10	45	184	43	正常	358	4	26	124	36	正常	200
12	29	48	43	正常	370	5	15	250	36	正常	740
14	52	314	43	正常	370	6	75	60	40	正常	79
18	8	280	37	卫星不健康	370	9	64	322	39	正常	133
20	17	170	40	正常	371	10	28	198	36	正常	699
22	10	320	42	正常	355	13	1	212	34	仰角太低	127
25	60	100	42	正常	257	14	61	164	36	正常	142
26	6	202	35	正常	396	16	77	34	39	正常	131
31	47	260	40	正常	646	24	78	32	41	正常	854
32	74	2	41	正常	323	25	41	236	46	正常	170
						26	27	48	44	正常	111

图 17 单宽带 75dB 测试结果

GPS_L1(11,8)						BD2_B1(12,11)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	304	39	残差过大	327	2	33	226	35	正常	848
10	45	184	42	正常	329	4	26	124	34	正常	171
12	29	48	43	正常	341	5	15	250	32	正常	711
14	52	314	42	正常	341	6	75	60	37	正常	50
18	8	280	37	卫星不健康	341	9	64	322	35	正常	104
20	18	170	38	正常	342	10	28	198	33	正常	670
22	10	320	40	正常	326	13	1	212	29	仰角太低	98
25	60	100	41	正常	228	14	61	164	34	正常	113
26	6	202	35	其它错误	367	16	77	34	36	正常	102
31	46	260	40	正常	617	24	79	32	40	正常	835
32	74	2	40	正常	294	25	41	236	41	正常	141
						26	27	48	40	正常	82

图 18 单宽带 85dB 测试结果

GPS_L1(11,8)						BD2_B1(11,11)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	302	37	残差过大	445	2	33	226	41	正常	966
10	44	184	43	正常	447	3	43	190	34	正常	24
12	29	48	43	正常	459	4	26	124	42	正常	289
14	52	314	42	正常	459	5	15	250	40	正常	629
18	7	260	37	卫星不健康	459	6	75	62	37	正常	166
20	17	170	40	正常	460	10	28	198	39	正常	788
22	10	320	42	正常	444	14	60	164	32	正常	231
25	60	98	43	其它错误	346	16	77	36	36	正常	220
26	7	202	35	正常	485	24	78	32	38	正常	953
31	47	260	39	正常	735	25	41	236	46	正常	259
32	75	6	41	正常	412	26	27	48	36	正常	200

图 19 三宽带 60dB 测试结果

GPS_L1(11,9)						BD2_B1(10,9)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	302	34	残差过大	476	2	33	226	41	正常	997
10	44	184	43	正常	478	3	43	190	33	正常	55
12	28	48	42	正常	490	4	26	124	42	残差过大	320
14	53	314	43	正常	490	5	15	248	40	正常	860
18	7	280	37	卫星不健康	490	6	75	62	37	正常	199
20	17	170	40	正常	491	10	28	200	39	正常	819
22	11	320	43	正常	475	16	77	36	35	正常	251
25	61	96	43	正常	377	24	77	32	37	正常	984
26	7	202	34	正常	516	25	41	238	47	正常	290
31	47	260	38	正常	766	26	26	48	34	正常	231
32	75	6	41	正常	443						

图 20 三宽带 70dB 测试结果

GPS_L1(11,8)						BD2_B1(14,12)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	304	43	残差过大	227	1	38	146	39	正常	63
10	46	184	43	其它错误	229	2	33	226	40	正常	748
12	30	48	43	正常	241	3	43	190	37	正常	755
14	51	314	43	正常	241	4	26	124	38	正常	71
18	8	282	37	卫星不健康	241	5	15	250	36	正常	611
20	18	170	39	正常	242	6	75	58	39	残差过大	755
22	9	320	43	正常	226	7	50	178	36	正常	13
25	60	102	42	正常	128	9	64	322	38	正常	4
26	5	202	38	正常	267	10	27	198	37	正常	570
31	46	258	41	正常	517	14	62	164	39	正常	13
32	74	0	41	正常	194	18	90	0	40	Z计数错误	2
						24	79	32	43	正常	735
						25	40	236	44	正常	41
						26	28	48	44	正常	14

图 21 单扫频 75dB 测试结果

GPS_L1(11,8)						BD2_B1(14,10)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	304	42	残差过大	245	1	38	146	35	残差过大	100
10	46	184	43	正常	247	2	33	226	39	正常	765
12	30	48	43	正常	259	3	43	190	31	正常	772
14	51	314	42	正常	259	4	26	124	34	残差过大	88
18	8	280	37	卫星不健康	259	5	15	250	34	正常	628
20	18	170	39	其它错误	260	6	75	58	39	残差过大	772
22	9	320	42	正常	244	9	64	322	37	正常	21
25	60	100	41	正常	146	10	27	198	37	正常	587
26	6	202	38	正常	285	13	1	212	34	仰角太低	15
31	46	258	42	正常	535	14	62	164	36	正常	30
32	74	0	40	正常	212	16	77	32	39	正常	19
						24	79	32	42	正常	752
						25	40	236	44	正常	58

图 22 单扫频 85dB 测试结果

GPS_L1(11,8)						BD2_B1(10,7)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	304	42	残差过大	183	1	38	146	40	正常	39
10	46	184	42	正常	185	2	33	226	40	正常	704
12	30	48	43	正常	197	3	43	190	31	正常	711
14	51	312	43	其它错误	197	4	90	0	42	星历不完整	27
18	8	282	38	卫星不健康	197	5	15	250	38	正常	567
20	19	170	39	正常	198	6	75	58	33	正常	711
22	9	320	42	正常	182	10	27	198	38	正常	526
25	60	102	42	正常	84	13	1	212	37	仰角太低	78
26	5	202	39	正常	223	24	80	32	35	残差过大	691
31	46	258	42	正常	473	26	28	48	31	正常	692
32	74	0	41	正常	150						

图 23 三扫频 60dB 测试结果

GPS_L1(11,8)						BD2_B1(10,6)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	304	43	残差过大	148	1	90	0	39	星历不完整	4
10	47	186	41	正常	150	2	33	226	40	正常	669
12	30	48	43	正常	162	3	43	190	31	正常	676
14	50	312	43	正常	162	5	15	250	38	正常	532
18	8	282	37	卫星不健康	162	6	75	58	34	正常	676
20	19	170	39	正常	163	10	27	198	37	正常	491
22	9	320	42	正常	147	13	1	212	38	仰角太低	43
25	60	102	42	正常	49	24	80	32	36	残差过大	656
26	5	202	39	正常	188	25	90	0	45	星历不完整	7
31	45	258	41	正常	438	26	28	48	33	正常	657
32	73	358	39	其它错误	115						

图 24 三扫频 70dB 测试结果

其次施加 L1 频段干扰，测试结果如下图所示。

GPS_L1(10,4)						BD2_B1(13,13)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	90	0	41	星历不完整	22	1	38	146	40	正常	250
10	90	186	39	正常	42	2	33	226	39	正常	244
12	90	0	45	星历不完整	12	3	43	190	40	正常	251
14	48	310	42	正常	62	4	26	124	40	正常	248
18	9	284	41	其它错误	62	5	15	250	38	正常	107
22	6	322	40	正常	242	6	75	54	38	正常	251
24	90	0	39	星历不完整	9	7	48	178	38	正常	246
25	59	110	34	残差过大	248	9	63	322	38	正常	250
31	90	0	46	星历不完整	13	10	26	198	38	正常	66
32	71	350	41	正常	68	14	66	162	39	正常	243
						24	83	32	38	正常	231
						25	37	234	44	正常	226
						26	31	48	41	正常	232

图 25 单宽带 75dB 测试结果

GPS_L1(10,5)						BD2_B1(13,13)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	6	308	43	正常	111	1	38	146	39	正常	339
10	49	186	37	其它错误	49	2	33	226	39	正常	333
12	90	0	43	星历不完整	13	3	43	190	38	正常	340
14	48	310	43	正常	151	4	26	124	38	正常	337
18	9	284	40	卫星不健康	151	5	15	250	38	正常	196
22	7	322	43	正常	63	6	75	54	38	正常	340
24	10	60	36	正常	98	7	48	178	36	正常	335
25	90	0	41	星历不完整	13	9	63	322	38	正常	339
31	43	256	44	残差过大	102	10	26	198	37	正常	155
32	72	352	42	正常	177	14	65	162	38	正常	332
						24	82	32	39	正常	320
						25	37	234	45	正常	315
						26	30	48	42	正常	321

图 26 单宽带 85dB 测试结果

GPS_L1(8,8)						BD2_B1(11,11)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	310	38	正常	60	1	38	146	41	正常	60
10	52	186	36	正常	63	2	33	226	39	正常	54
12	33	52	36	正常	64	3	43	190	41	正常	61
22	5	322	36	正常	52	4	26	124	41	正常	58
24	11	60	31	正常	60	6	74	52	40	正常	61
25	59	112	45	正常	58	7	47	178	39	正常	58
31	42	254	48	正常	55	9	63	320	39	正常	60
32	71	346	39	正常	24	14	67	162	41	正常	53
						24	84	34	42	正常	41
						25	36	232	44	正常	36
						26	32	48	42	正常	42

图 27 三宽带 60dB 测试结果

GPS_L1(7,5)						BD2_B1(11,11)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	90	0	38	星历不完整	13	1	38	146	41	正常	139
10	51	186	38	正常	142	2	33	226	39	正常	133
12	33	52	32	正常	143	3	43	190	40	正常	140
22	6	322	38	正常	131	4	26	124	40	正常	137
25	59	112	43	正常	137	6	75	52	40	正常	140
31	42	254	47	正常	134	7	48	178	39	正常	135
32	71	346	39	残差过大	103	9	63	322	39	正常	139
						14	67	162	40	正常	132
						24	84	34	41	正常	120
						25	36	232	44	正常	115
						26	31	48	42	正常	121

图 28 三宽带 70dB 测试结果

GPS_L1(10,7)						BD2_B1(13,13)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	306	42	正常	192	1	38	146	41	正常	420
10	49	186	38	残差过大	130	2	33	226	39	正常	414
12	31	50	44	正常	94	3	43	190	40	正常	421
14	49	312	44	正常	70	4	26	124	40	正常	418
18	9	284	36	卫星不健康	232	5	15	250	37	正常	277
22	7	320	42	正常	144	6	75	56	38	正常	421
24	9	60	38	其它错误	179	7	49	178	39	正常	416
25	60	106	36	正常	94	9	64	322	38	正常	420
31	44	256	46	正常	183	10	26	198	38	正常	236
32	72	354	43	正常	65	14	64	162	39	正常	413
						24	82	32	37	正常	401
						25	38	234	44	正常	396
						26	30	48	42	正常	402

图 29 单扫频 75dB 测试结果

GPS_L1(10,7)						BD2_B1(13,13)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	306	42	正常	169	1	38	146	40	正常	397
10	49	186	37	残差过大	107	2	33	226	39	正常	391
12	32	50	42	正常	71	3	43	190	40	正常	398
14	49	312	44	其它错误	47	4	26	124	39	正常	395
18	9	284	39	卫星不健康	209	5	15	250	37	正常	254
22	7	320	42	正常	121	6	75	54	38	正常	398
24	9	60	34	正常	156	7	49	178	38	正常	393
25	60	108	39	正常	71	9	64	322	38	正常	397
31	44	256	45	正常	160	10	26	198	38	正常	213
32	72	352	44	正常	42	14	65	162	38	正常	390
						24	82	32	37	正常	378
						25	38	234	44	正常	373
						26	30	48	42	正常	379

图 30 单扫频 85dB 测试结果

GPS_L1(11,5)						BD2_B1(13,13)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	90	0	46	星历不完整	18	1	38	146	40	正常	545
10	90	0	42	星历不完整	20	2	33	226	39	正常	539
12	31	50	44	正常	32	3	43	190	40	正常	546
14	50	312	43	正常	32	4	26	124	40	正常	543
18	9	282	34	卫星不健康	32	5	15	250	37	正常	402
20	20	170	39	正常	33	6	75	56	39	正常	546
22	90	0	43	星历不完整	17	7	49	178	39	正常	541
25	60	104	41	正常	219	9	64	322	38	正常	545
26	4	202	38	仰角太低	58	10	27	198	38	正常	361
31	45	256	42	正常	308	14	63	164	39	正常	538
32	73	356	38	残差过大	190	24	61	32	37	正常	528
						25	39	234	45	正常	521
						26	29	48	39	正常	527

图 31 三扫频 60dB 测试结果

GPS_L1(7,5)						BD2_B1(13,13)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
1	8	306	36	正常	260	1	38	146	41	正常	468
10	48	186	35	残差过大	198	2	33	226	39	正常	482
22	8	320	41	正常	212	3	43	190	40	正常	469
25	60	106	43	正常	162	4	26	124	40	正常	468
26	90	0	37	Z计数错误	1	5	15	250	37	正常	345
31	44	256	46	正常	251	6	75	56	38	正常	469
32	73	354	37	正常	133	7	49	178	38	正常	484
						9	64	322	39	正常	468
						10	27	198	38	正常	304
						14	64	164	39	正常	481
						24	61	32	37	正常	469
						25	38	234	44	正常	464
						26	29	48	42	正常	470

图 32 三扫频 70dB 测试结果

5.2.6.3 $\lambda/8$ 测试结果

测试用 $\lambda/8$ 波长阵面如图 33 所示。



图 33 测试用 $\lambda/8$ 波长阵面

静态收星效果如图 20 所示，其中 GPS L1 收星 6 颗；BDS B1 收星 7 颗。由此可见，受阵元间互耦影响，收星数量和载噪比较低。

GPS_L1(5,5)						BD2_B1(7,6)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
10	39	184	39	正常	54	1	38	146	39	正常	54
12	25	44	44	正常	54	2	32	226	37	正常	50
14	56	318	39	正常	52	4	26	124	36	正常	52
29	4	124	36	仰角太低	52	14	55	166	41	正常	54
31	51	266	43	正常	52	24	73	34	43	正常	54
32	77	26	42	正常	54	25	90	0	42	2计数错误	6
						26	23	50	39	正常	54

图 34 静态收星

GPS_L1(8,6)						BD2_B1(5,5)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
10	38	184	39	正常	112	2	32	226	34	正常	108
12	25	44	43	正常	112	4	26	124	33	正常	110
14	57	318	36	正常	110	24	73	34	37	正常	112
18	5	276	37	卫星不健康	25	25	45	242	40	正常	64
25	60	86	36	正常	27	26	22	50	34	正常	112
29	5	124	40	其它错误	110						
31	51	266	42	正常	110						
32	77	28	41	正常	112						

图 35 B1 三宽带 60dB 测试结果

GPS_L1(9,7)						BD2_B1(5,5)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
10	37	184	37	正常	233	2	32	226	34	正常	229
12	24	42	42	正常	233	4	26	124	33	正常	231
14	56	320	39	正常	231	24	72	34	38	正常	233
18	5	274	35	卫星不健康	146	25	46	242	39	正常	185
20	11	170	38	正常	41	26	22	50	35	正常	233
25	60	84	36	正常	148						
29	5	124	40	正常	231						
31	52	268	42	其它错误	231						
32	77	32	41	正常	233						

图 36 B1 三宽带 50dB 测试结果

GPS_L1(9,6)							BD2_B1(10,9)						
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间		编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	
3	90	0	38	星历不完整	24		1	38	146	38	正常	644	
10	30	182	38	残差过大	7		2	32	226	33	正常	58	
12	18	40	44	正常	194		4	26	124	39	正常	639	
14	64	326	42	正常	232		5	15	248	32	正常	822	
18	2	268	37	卫星不健康	314		9	68	326	33	正常	808	
25	57	70	34	正常	11		14	47	166	34	正常	644	
26	19	204	38	正常	8		23	90	0	39	卫星不健康	277	
29	10	118	39	正常	106		24	65	38	37	正常	1174	
31	57	278	45	正常	256		25	51	250	40	正常	1126	

图 37 B1 三扫频 50dB 测试结果

GPS_L1(11,2)							BD2_B1(8,6)						
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间		编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	
3	4	326	38	仰角太低	53		1	38	146	38	正常	673	
10	30	182	38	残差过大	36		4	26	124	39	正常	668	
12	18	40	43	卫星测试状态	223		5	15	248	32	残差过大	651	
14	64	326	42	卫星测试状态	261		14	46	166	34	正常	673	
18	2	268	34	卫星不健康	343		23	90	0	39	卫星不健康	306	
22	90	0	38	星历不完整	28		24	65	38	36	正常	1200	
25	57	68	35	其它错误	40		25	52	250	41	正常	1155	
26	20	204	39	残差过大	37		26	16	52	34	正常	483	
29	10	118	39	正常	136								
31	57	278	44	正常	285								
32	90	0	40	Z计数错误	2								

图 38 B1 三扫频 60dB 测试结果

GPS_L1(9,8)							BD2_B1(6,5)						
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间		编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	
10	37	182	33	正常	328		2	32	226	39	正常	324	
12	23	42	42	正常	328		4	26	124	33	残差过大	306	
14	58	320	39	正常	326		14	53	166	35	正常	14	
18	5	274	34	卫星不健康	241		24	71	34	43	正常	308	
20	10	170	39	正常	136		25	47	244	46	正常	280	
25	60	82	36	正常	243		26	21	50	38	正常	308	
29	6	122	42	正常	326								
31	52	270	42	正常	326								
32	77	36	41	正常	328								

图 39 单宽带 60dB 测试结果

GPS_L1(9,7)						BD2_B1(8,8)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
10	35	182	37	正常	9	1	38	146	38	正常	44
12	22	42	45	正常	12	4	26	124	36	正常	39
14	60	322	40	正常	12	5	15	248	35	正常	222
22	16	316	41	正常	12	9	67	324	38	正常	206
25	59	78	35	伪距平滑不足	3	14	51	166	38	正常	44
26	15	202	37	正常	7	16	79	50	36	正常	176
29	7	122	39	正常	572	24	69	36	42	正常	574
31	54	272	44	正常	572	25	48	246	41	正常	526
32	77	44	43	其它错误	12						

图 40 L1 单宽带 60dB 测试结果

GPS_L1(10,5)						BD2_B1(9,9)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
10	32	182	36	正常	144	1	38	146	40	正常	348
12	20	40	35	正常	147	4	26	124	36	正常	343
14	90	0	36	星历不完整	22	5	15	248	35	正常	526
18	3	270	40	卫星不健康	18	9	67	326	38	正常	512
22	18	314	36	残差过大	147	14	49	166	38	正常	348
25	58	74	30	正常	147	16	79	54	36	正常	480
26	17	202	36	正常	147	24	67	36	39	正常	878
29	90	0	37	星历不完整	28	25	50	248	40	正常	830
31	55	274	43	残差过大	876	26	18	52	39	正常	138
32	77	56	35	正常	148						

图 41 L1 三宽带 50 dB 测试结果

GPS_L1(8,4)						BD2_B1(10,9)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
10	32	182	35	正常	173	1	38	146	39	正常	377
12	20	40	34	正常	176	4	26	124	36	正常	372
18	3	270	39	卫星不健康	47	5	15	248	34	正常	555
25	58	72	30	正常	176	9	67	326	37	正常	541
26	18	202	35	正常	176	14	49	166	38	正常	377
29	9	120	37	残差过大	55	16	79	54	36	正常	509
31	90	0	43	星历不完整	27	23	90	0	40	星历不完整	10
32	77	56	33	其它错误	177	24	67	36	39	正常	907
						25	50	248	39	正常	859
						26	18	52	39	正常	167

图 42 L1 三宽带 60 dB 测试结果

GPS_L1(6,3)						BD2_B1(10,9)					
编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间	编号	仰角	方位角	信噪比	状态	锁定时间
10	31	182	37	正常	37	1	38	146	39	正常	486
12	19	40	40	正常	36	4	26	124	37	正常	481
14	83	324	38	其它错误	74	5	15	248	34	正常	664
18	2	270	36	卫星不健康	156	9	68	326	38	正常	650
26	18	202	34	残差过大	285	14	48	166	38	正常	486
31	56	276	42	正常	98	16	79	56	36	正常	616
						23	90	0	40	卫星不健康	119
						24	66	36	40	正常	1016
						25	50	248	40	正常	968
						26	17	52	39	正常	276

图 43 L1 三扫频 50 dB 测试结果 临界 时定时不定

5.2.7 结论

抗干扰天线在阵子间距在 $\lambda/2$ 时，抗单干扰、三干扰性能可以达到 105/95；

抗干扰天线在阵子间距在 $\lambda/4$ 时，抗单干扰、三干扰性能可以达到 95/85；

抗干扰天线在阵子间距在 $\lambda/8$ 时，静态收星数量与载噪比都较低，远远达不到正常收星的水平。具有一定的抗干扰能力，但指标较低。