

しかし同ケーブルの性能であっても、図1に示した空洞～ダウンコンバーター間を結ぶ40mもの長さを信号伝送したと仮定し、季節変動を含めて35℃の温度変化を想定すると最悪12度も位相が動いてしまうのでそのままでは使用することができない。この問題解決策としては現在のところ下記の①②③が候補として挙げられており、場合によっては複数の対策を講じるにより目標を達成しなければならず、今後の大きな課題の1つとなる。

ケーブル問題解決策の候補

- ① さらに温度係数の小さなケーブルの模索
- ② 同軸ケーブルの温度管理の徹底^[2]
- ③ 位相長の変化分の補正策を講じる^[3]

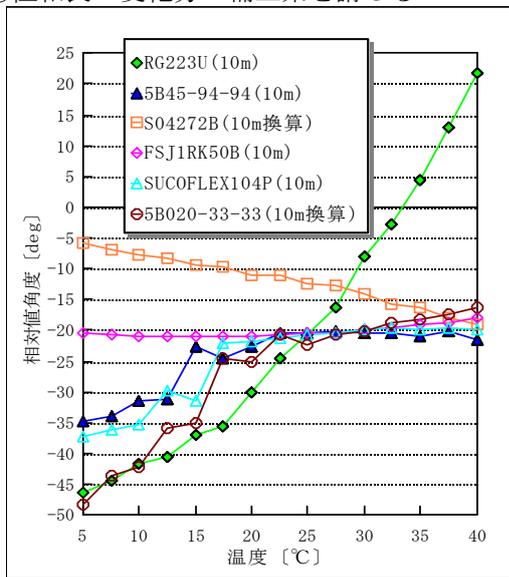


図2 同軸ケーブルの温度依存性 (位相)

4. BPFの温度依存性

使用予定のBPF (型番: 5C7-1310-6 S11/REACTEL社製: 中心周波数1310MHz、帯域幅約5MHz) の振幅/温度特性について測定を行なった結果、図3に示す結果が得られた。

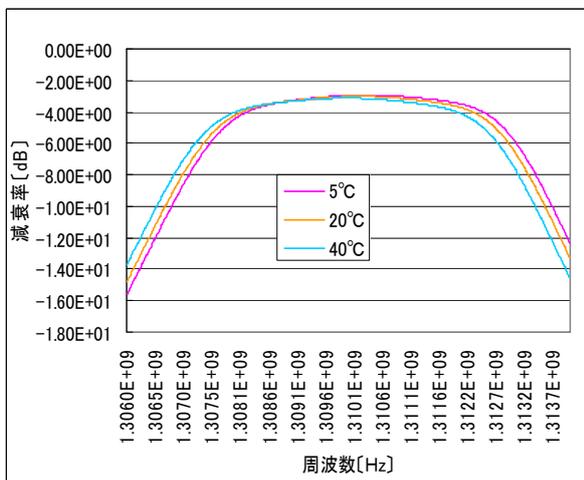


図3 BPFの振幅/温度特性

1310MHzのBPFは複数のキャビティーが直列に配置された構造になっているため、温度が上昇すると熱膨張により共振周波数が低下する傾向にあることがわかった。

測定の結果、位相の温度係数は0.5~0.6deg/℃であり、±1℃以内程度の安定した温度環境に設置しても、この位相特性が直接安定度に反映される回路構成にしてしまうと目標仕様に達しない。このため、现阶段では図1に示した様に基準となるRF信号によりBPF等の位相変化を補償する構成にする必要があると考えている。

BPFの振幅に関する温度係数はカットオフ周波数の影響を受けるため、帯域内であっても周波数依存性を持つが、0.01~0.02 [dB/℃] 程度の振幅変化であることを確認した。

(BPF、及び分周器の出力は、ダウンコンバーターで用いる局所発振器 (LO) 生成の途中段階で用いられるため、振幅が多少変化してもダウンコンバーター出力への影響は大きくはないと思われるが、今後確認のための実証実験が必要であると考えている。)

5. 分周器

分周器 (型番: DDIV-01/DSテクノロジー社製) については周波数分割比を1:1として周波数1300MHzでの測定を行なった。

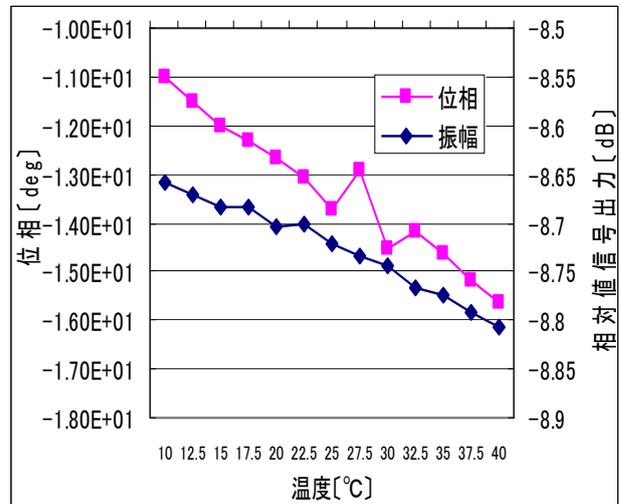


図4 分周器の温度係数測定結果

図4に示す様に位相の温度係数は0.15~0.17 [deg/℃] 程度であり、実際に使用される条件では1/32の周波数でデジタルフィードバック基板にクロックを送り、又、IQ変調回路には1/128に分周した信号を送るため、分周器の温度依存性に関する影響は上記の数値よりは小さいと考えている。又、出力振幅の温度係数は0.005 [dB/℃] 前後であるが、BPFの項目ですでに述べた様に制御対象に与える影響は小さいと考えている。

6. ダウンコンバーター

ダウンコンバーター（型番：CDX-KEK016MC / CANDOX社製）は24チャンネルのものであり、そのうち2チャンネルについて測定を行なった。温度特性は入力と出力の周波数が異なるため、測定は図5に示す構成にて行なった。測定結果を図6に示す。

振幅に関しては比較的綺麗な直線に乗っているのに対し、位相は誤差が増大した様に見受けられる。誤差増大の要因は、測定のためのセットアップが複雑化した為、アンプ、BPF等の不安定な要素が室温管理下で増えたことが原因で、若干の室温等の変化により、ダウンコンバーターに送るLO信号の位相が変動したのではないかと推測される。

上記に述べた通り測定方法に改善の余地が残るが、大まかな傾向としては参考になるとと思われる。

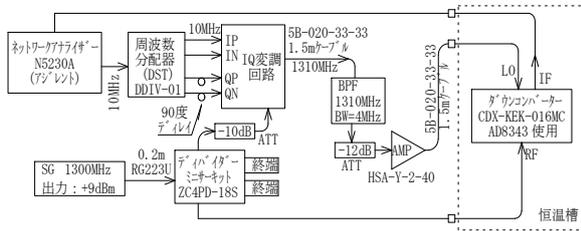


図5 ダウンコンバーター測定セットアップ

位相の温度係数は（CH1）約-0.06（CH2）-0.12 [deg/°C] 程度、振幅の温度依存性は-0.013~-0.014 [dB/°C] であった。

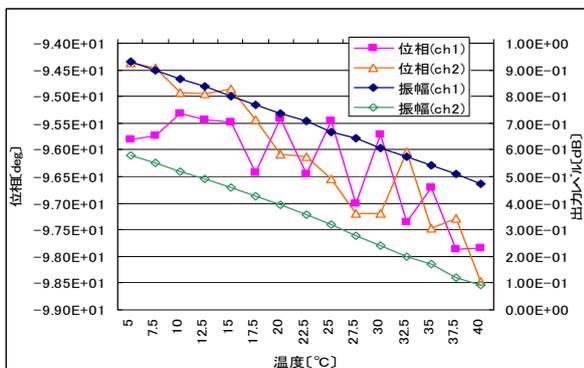


図6 ダウンコンバーター温度特性

7. IQ変調器

IQ変調器はLO信号生成のために使用され、本来10MHzのIF信号を入力して測定を行なうべきものであるが、ダウンコンバーターの測定と同様に複雑な測定セットアップが必要となり誤差が増える可能性があり、又、10MHzの入力位相の変化は1.3GHzと比較すると影響が小さいと推測されることから、今回はRF入力に-10dBm周波数1300MHzの信号を入力してIとQの入力（IF入力）の4箇所にはバイアスをかけてIFに直流をかけたのと同じ条件を作りRF入力と同じ周波数の出力を測定する手法で温度依存性の評価を行なった。

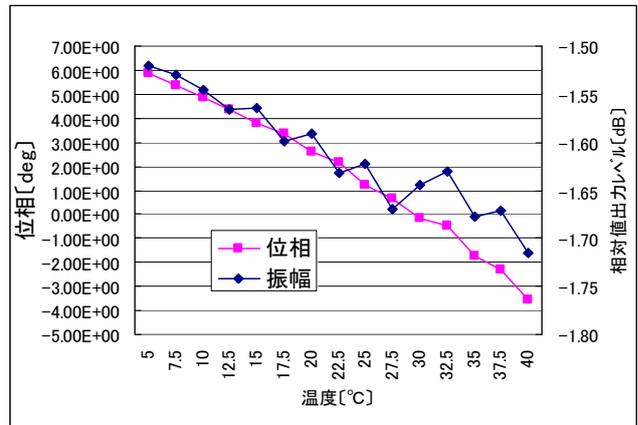


図7 IQ変調器温度特性 測定周波数 1300MHz (ケーブル特性補正後)

8. まとめ

一連の測定結果を表1にまとめる。

今後の課題は主に下記の3点である。

- ①項目3.で述べたケーブル問題の解決。
- ②IQ変調器のIC単体、分周器のIC単体、その他の部品についても温度係数を調査して行き、温度に対する不安定要素の究明をしたいと考えている。
- ③ダウンコンバーターのLO入力の変化量に対する出力信号への影響確認のための実証実験を行なう

製造会社	コポーネント名	規格又は製品型番 (使用IC名)	測定温度範囲 [°C]	周波数 [GHz]	位相	振幅	環境温度差 [°C]	長さ [m]	位相変化 [deg]	振幅変化 [dB]	振幅変化 [%]	備考	
					温度係数 [deg/°C]	温度係数 [dB/°C]							
アトリュー	同軸ケーブル	FSJ1RK-50	25°C付近 25~35	1.3	0.1	-0.0041	1	2	0.02	-8E-04	-0.01		
					0.15	-0.0041							
REACTEL	BPF	5C7-1310-6 S11	5~40	1.308	-0.595	0.0107	1	10	40	-0.595	0.0107	0.123	
					1.312	-0.559				-0.0167	-0.559	-0.0167	
DST	分周器	DDIV-01 (NS LMK01000)	10~40	1.3	-0.154	-0.005	1	1	1	-0.154	-0.005	-0.06	
					1.31	-0.157				-0.0051	-0.157	-0.0051	
CANDOX	ダウンコンバーター	CDX-KEK016MC (AD8343ARU)	5~40	1.31	-0.058	-0.0131	1	1	1	-0.058	-0.0131	-0.15	ch1
					1.31	-0.117				-0.0139	-0.117	-0.0139	-0.16
ツジ電子	IQ変調器	(AD8346)	5~40	1.3	0.269	-0.0056	1	1	0.269	-0.0056	-0.06		

赤色表示の数値は仕様範囲を超えることが予想されるもの
注:ケーブルの温度係数は10mあたりの数値です。

表1 LLRFで使用する機器の温度安定度

どの構成要素1つを取っても位相で0.1度、振幅で0.1%という要求仕様を満足するには、温度管理を行ない、細心の注意を払って取り扱う必要があり、この要求仕様を満足するためには影響を最小に抑える回路構成が不可欠であると言えよう。

参考文献

- [1] 編集：羽島良一、他 コンパクトERLの設計研究 KEK Report 2007-7 JAEA-Research 2008-32
- [2] 永井良治 et al “RF基準信号分配用ケーブルの電気長安定化” 第28回リニアック技術研究会プロシテイングス http://www.pasj.jp/web_publish/lam28/proceedings/TP-3.pdf
- [3] 永井良治 et al “高周波分配ケーブルの位相変動補償” 第3回日本加速器学会プロシテイングス
- [4] K.Harada et al., “cERLの進捗状況”, In these proceedings, THPS001.
- [5] T. Miura et al., " KEKにおけるcERLの高周波源 ", In these proceedings, THPS049