基地局用高温超電導受信機

低損失・高選択度な高温超電導フィルタ，所内試作した極低温低雑音増幅器，新考案の高効率放熱システムおよび新開発の高信頼小型冷凍機を適用し，小型・高効率かつ高信頼な「2GHz帯基地局用（CRFE）」を新たに開発した．

本稿では，開発した新技術のポイントを述べるとともに，人工雑音の実験評価およびCRFEによるサービスエリア拡大の推定を行い，CRFEの基地局適用性を明らかにする．

楢橋 祥一　佐藤 圭　三村 哲也　野島 俊雄

1. まえがき

1911年にオランダのカマリン・オンネスは水銀の電気抵抗が冷却温度4K（−269℃）でゼロになることを発見し，この現象を超電導（Superconductivity）と名づけた．この発見以来，ほかの物質や元素についても実験が行われ，今日までにさまざまな超電導体*が発見されている．超電導体の最も基本的な特性は，ある温度（臨界温度という）以下で直流電気抵抗がゼロになる完全導体性と，ある臨界値以下の磁界では超電導体内から常に磁束を排除するマイスナー効果である．この物理的性質に着目し，たとえば超電導磁気浮上式鉄道，医療用・加速器用超電導マグネットなどの実用化研究が現在も推進されている[1]．

超電導体を高周波数帯，具体的には移動通信システムに適用されるマイクロ波帯へ適用する場合を考える．超電導体は高い周波数f[Hz]の電磁波に対しても$hf<\Delta$（h：プランク定数，Δ：エネルギーギャップ）である限り，0Kでは電気抵抗ゼロで損失は生じない．しかし，有限温度であれば電流は超電導電子と常電導電子の両方が担っているため[2]，小さくはあるが周波数とともに増大する有限の表面抵抗を生ずる（図1）．したがって，直流のように電気抵抗がゼロになるような劇的な効果は生じないが，非超電導材料と比較すると極めて電気抵抗の小さい画期的なデバイスへの展開が期待できる．この効果から，たとえば超電導体をフィルタに適用すれば，多段化しても挿入損失を極めて小さく抑えられるので理想的なフィルタを構成できる可能性がある．

移動通信システムでは，隣接帯域信号による干渉を受けないようにしつつ，できる限り帯域を接近させることが望ましいので，基地局受信系では高感度を維持するとともに高い選択度が要求される．よって，移動通信システムにおける基地局受信系では以下の2つの技術を確立することが極めて重要となる．

第1に，受信フィルタの減衰特性の急峻化である．上述のように既存のフィルタでは達成困難な，極めて高い選択度を有する可能性のある高温超電導受信フィルタ（HTSF：High Temperature Superconducting Filter）の基地局無線装置への適用を検討することが重要である．

第2に，高感度化，すなわち受信雑音の極限的低減化である．これは，一基地局当りの無線ゾーンの拡大または携帯電話機出力の低減を可能にする．トラヒックの少ない郊外地においては一基地局当りの無線ゾーンを拡大できるので，より少ない基地局数で所望のサービスエリアを展開できる．一方，トラヒックの多い都市部ではマイクロ

*超電導体：鉛（Pb），ニオブ（Nb），ランタン（La），バナジウム（V）などの超電導元素，N_3Si，Nb_3Sn，Nb_3TlGe，Nb_3Geなどの合金，金属間化合物，Y-Ba-Cu-O，Bi-Sr-Ca-Cu-O，Tl-Ba-Ca-Cu-Oなどの酸化物超電導物質

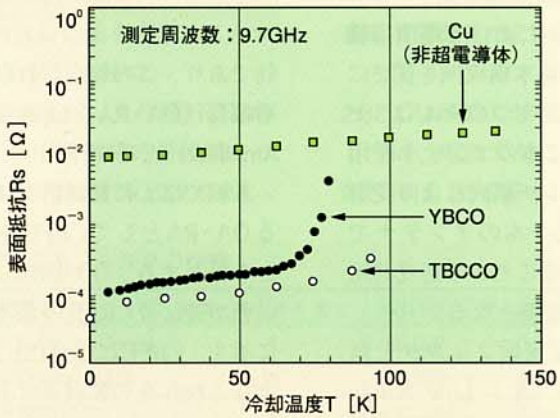


図1　超電導体の表面抵抗（Rs）

セル化が必要であり，無線ゾーンを拡大することはできない．基地局受信高感度化は携帯電話機の出力低減に利用できるので，携帯電話機の低消費電力化に有効である．

これらを同時に達成可能な技術のひとつとして，HTSFと極低温低雑音増幅器（CLNA：Cryogenic Low Noise Amplifier）を極低温冷却装置（Cooler）を用いて冷却する，極低温受信フロントエンド（CRFE：Cryogenic Receiver Front End）がある．

米国においてもCRFEに関する研究が進められており，フィールド試験により一基地局当りのサービスエリア拡大やドロップコール低減等の効果が確認されている[3]．

本稿では，CRFEを開発する際の技術的要となる，「基本構成および感度改善効果」，「HTSF」，「CLNA」および「Cooler」について，それぞれが持つ課題とこれまでに開発してきた成果を述べる[4] [5] [6]．また，都市部および郊外部における，人工雑音が信号伝送に及ぼす影響を，実際のAPD（Amplitude Probability Distribution）特性を基に解析する．さらに，CRFEを移動通信システム基地局受信装置に適用する場合のサービスエリア拡大効果を評価する．

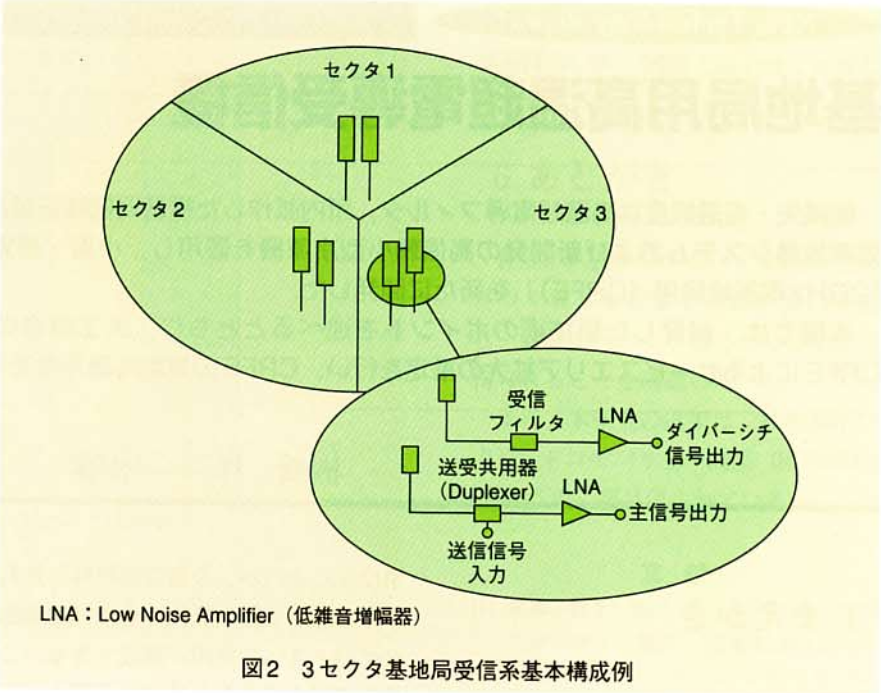


図2　3セクタ基地局受信系基本構成例

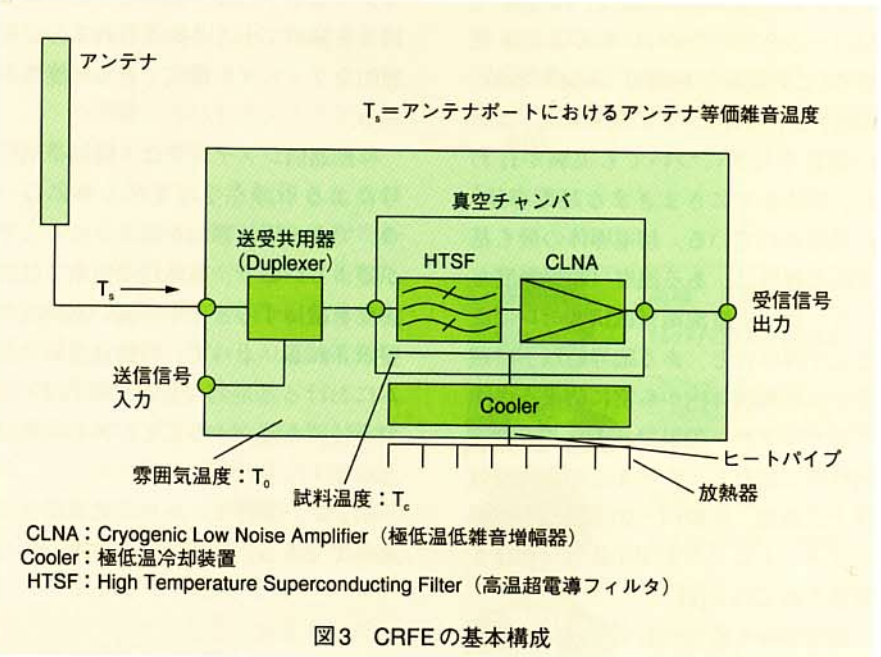


図3　CRFEの基本構成

2. 小型極低温受信フロントエンド

2.1　基本構成と感度改善効果

移動通信システムにおける塔頂搭載型基地局受信系の基本構成例を図2に示す．この例では，1つのセルは3セクタで構成され，2本のアンテナを用いた空間ダイバーシチ構成により受信される．そのうち1本のアンテナでは，送信と共用することから送受共用器（Duplexer）が必要となる．

Duplexerまたは受信フィルタと低雑音増幅器（LNA：Low Noise Amplifier）で構成される部分をアンテナ近傍に設置する方法が高感度化に有効であり，この場合これらを塔頂受信増幅器（OA-RA：Open Air Receiver Amplifier）と呼ぶ[7]．

本稿では，移動通信システムにおけるOA-RAとしてCRFEを適用することを検討する．今回開発した小型・高信頼2GHz帯CRFEの基本構成を図3に示す．CRFEにはHTSF，CLNA，およびこれらを77K以下に冷却するための真空チャンバならびにCoolerと，HTSFの前段に1本のアンテナを送信および受信に共用するための送受共用器（Duplexer）が配置されている．また，Coolerで発生する熱は，ヒートパイプを介して外部の放熱器により排出される．

表1にCRFEを構成するHTSF，CLNA，およびCoolerの主要特性を示す．OA-RAとしてCRFEを適用する際，アンテナ近傍に設置することからCRFEは小型かつ低消費電力であることが望ましい．

CRFEの大きさおよび消費電力は，主としてCoolerに依存する．Coolerの小型化・省電力化を達成することは極めて重要である．

CRFEを適用する場合の感度改善効果について，感度は受信機の入力雑音で規定される．入力雑音には，アンテナ雑音（アンテナ自身が発生する熱雑音および黒体輻射で表される地表放射雑音），人工雑音，干渉雑音などがあるが，ここではアンテナと受信系に着目した熱雑音（受信系で発生する熱雑音およびアンテナ雑音）を扱う．

熱雑音レベルを温度で表現したものを等価雑音温度といい，雑音電力N[W]と等価雑音温度T[K]との間には$N=kTB$の関係が成り立つ．ただし，kはボルツマン定数（$k=1.38\times10^{-23}$ [J/K]），Bは帯域幅を表す．

常温での現状技術および素子を用いた小型化フロントエンド構成をとる場合，等価雑音温度は300K程度と推定される．図3において，CRFEの等価雑音温度およびアンテナポートにおけるアンテナ等価雑音温度を，それぞれT_RおよびT_Sとするとき，$(300+T_S)/(T_R+T_S)$は受信感度改善量を表す．T_Rを変化させたときのT_Sに対する受信感度改善量は図4となる．郊外地におけるフィールド試験の結果からT_Sは2GHz帯にて270Kであること[5]，今回開発したCRFEのT_Rは50K以下を達成していることから，2.5dBの感度改善効果が見込める．

表1　CRFEの主要特性

HTSF	中心周波数：1.93GHz 通過帯域幅：20MHz 挿入損失：<0.4dB	70K
CLNA	帯域：1.9-2.0GHz 利得：30dB 等価雑音温度：<25 K	70K
Cooler	冷凍能力：2-3W（77K） 信頼性：5年間メンテナンスフリー（推定値）	

CLNA：Cryogenic Low Noise Amplifier（極低温低雑音増幅器）
Cooler：極低温冷却装置
HTSF：High Temperature Superconducting Filter（高温超電導フィルタ）

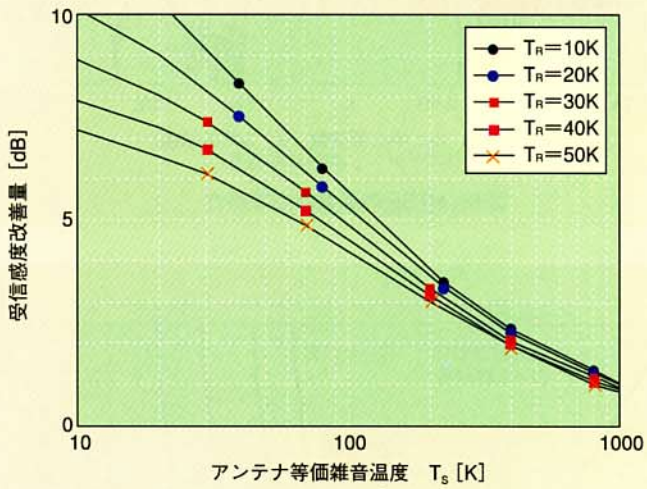


図4　T_sに対する受信感度改善量

2.2　HTSF特性比較

今回評価した超電導フィルタの概略および周波数特性をそれぞれ表2および図5に示す．また，比較のために1.5GHz帯ディジタル自動車電話方式（PDC：Personal Digital Cellular）基地局受信装置用誘電体（Dielectric）フィルタの特性も示している．ここで3種類のフィルタの中心周波数は異なるが，図5では比較のため，それぞれの中心周波数をf_c，3dB帯域幅をBと規格化している．ここでは，フィルタ特性の単純な比較を行ったが，厚膜（Thick Film）および薄膜（Thin Film）HTSFは一般的な誘電体フィルタと比較して高い無負荷Q値を有することから，急峻な減衰特性を持つ．

特に今回測定を行った厚膜HTSFの減衰特性は，3dB帯域幅の帯域端から20dB/100kHzの急峻な減衰量を有し，周波数選択性の点で優れている．ただしキャビティ構造を有していることから，その寸法は4,400cm^{3}と大きい．薄膜HTSFは，その帯域外減衰特性が4dB/100kHzと劣るが，マイクロストリップ構造を有していることから，28.8cm^{3}とその寸法は小さい．

CRFEは低雑音化の観点からアンテナ直下に設置されるため，小型が望まれる．今回開発したCRFEは寸法を考慮して薄膜HTSFを使用した．

2.3　CLNA冷却特性

今回，電波天文における超低雑音増幅技術[8] [9]を基本に，2GHz帯におい

表2　評価したフィルタの概略

種類	構造	超電導材料	極数（ノッチを含む）	無負荷Q	挿入損失 [dB]	体積 [cm^3]
薄膜HTSF	マイクロストリップ	TBCCO（Tl-Ba-Ca-Cu-O）	8	30,000	0.31	28.8
厚膜HTSF	キャビティ（1/2波長リング共振器）	YBCO（Y-Ba-Cu-O）	16	60,000	0.32	4400
誘電体フィルタ	デュアルモード誘電体共振器	非超電導体	6	< 10,000	0.30	2160

HTSF：High Temperature Superconducting Filter（高温超電導受信フィルタ）

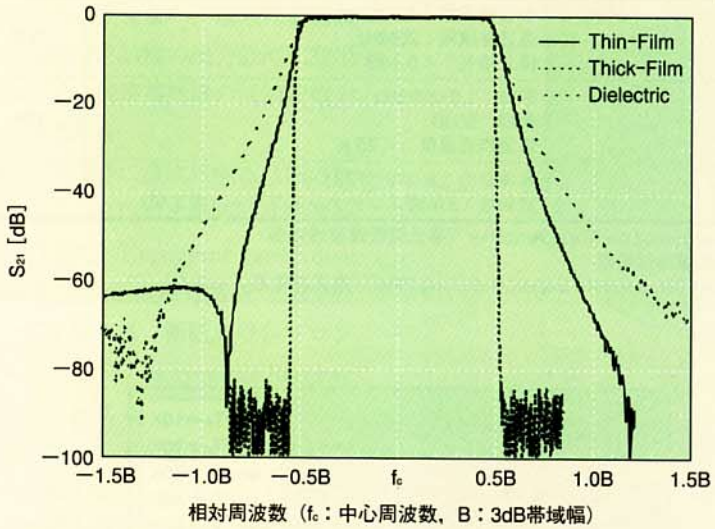
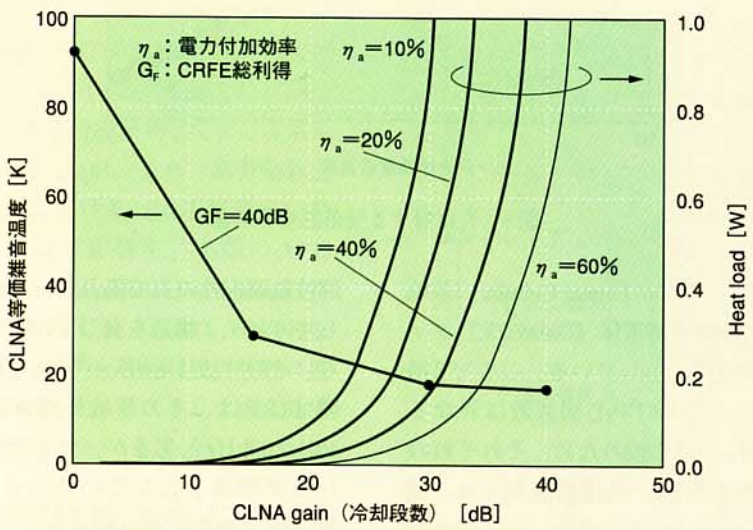


図5　HTSFの周波数応答特性



CLNA：Cryogenic Low Noise Amplifier（極低温低雑音増幅器）
CRFE：Cryogenic Receiver Front End（極低温受信フロントエンド）

図6　CLNAの冷却段数に対する等価雑音温度

てCLNAを開発した．表1に示すように，冷却温度70Kにて等価雑音温度25K以下を達成している．CLNAの設計にあたっては，低雑音化と高利得化を同時に達成するとともに発熱をできる限り抑えることが極めて重要である．

図6は最大許容入力レベルを一定としたときのCLNAの冷却段数（ただし，ここではgainで表記している）に対する，CLNAの等価雑音温度を示す．また，CLNAで発生する熱量をHeat Loadと定義し，CLNAの効率を変化させたときのHeat Loadも示す．

CLNAの総利得が40dBの場合，初段のみ（CLNA gain＝15dB）および2段目まで（CLNA gain＝30dB）冷却したときの等価雑音温度は，冷却しない場合と比較して65Kおよび75K低減されるが，全段冷却（CLNA gain＝40dB）による等価雑音温度低減効果は少ない．したがって，1ないし2段冷却すればよい．次に，Heat Loadは，例えば効率40％で2段目まで冷却した場合，0.15Wとなる．

2.4　Coolerの信頼性評価

Coolerは，CRFEの小型化・高効率化を図るうえで鍵となる装置である．表3にCoolerに用いられる各種冷凍方式を示す．ここでは，冷却温度77K，冷凍能力5Wにて評価している．小型化・高効率化を達成するとともに5年以上動作するものはスターリング型パルス管方式以外にはない．

今回開発したCRFEには，国内の有

表3　Coolerにおける冷凍方式

方式＼項目	膨張部	効率	能力	寿命	大きさ	コスト	長所	特徴
スターリング	往復運動	1	◎	×	◎	◎	・高効率 ・小型化が可能 ・高出力化が可能	・理論上，最大効率 ・無潤滑摺動部が必要なため，長寿命化不可
GM	往復運動	0.5〜0.7	○	○	△	○	・比較的長寿命 ・低騒音，低振動	・圧縮部の回転数が小さく，超寿命 ・圧縮部と冷凍部がバルブで分離されているため，油潤滑が可能である反面，小型化は難しい
パルス管	固定弁（スターリング型）	0.3〜0.6	○	◎	◎	○	・膨張部長寿命,低振動 ・構造簡単	・膨張部に可動部がなく，基本的に長寿命かつ低振動 ・効率はスターリングの半分程度
	稼動弁（GM型）	0.3	○	○	△	○	・比較的超寿命,低振動 ・構造簡単	

力冷凍機メーカとともに試作した高信頼，小型・高効率スターリング型パルス管Coolerを使用している．本Coolerでは，故障原因としては偶発故障のみが想定され，永久的な動作が期待できる[10]．現在，偶発故障を評価するため，同じ構造を持つ，冷凍能力5W（77K）のCooler 4台を連続運転している．

図7に今までに得られた連続運転データの一例を示す．試料温度は73.8K±0.9Kで安定しており，消費電力も260W±15Wと，消費電力の増加傾向は見られない．また，延べ連続運転時間は43,640（＝10,910×4）時間に達した．T時間中における故障数がゼロ，すなわち無故障の場合，信頼水準（$1-\alpha$）におけるCoolerの故障までの平均時間（MTTF：Mean Time to Failure）の信頼水準最低限界は次式に従う[11]．

$$(MTTF)_L = \frac{2T}{\chi^2(2,\ \alpha)} \qquad (1)$$

ここで，分母は自由度2，危険率αのχ^2分布を表す．

図8にMTTFの目標値を40,000時間としたときの，無故障連続運転延べ時間に対する信頼水準最低限界を示す．2000年6月30日現在の信頼水準は，約65％であることがいえる．

3. 2GHz帯小型・高信頼CRFE

今回開発した，2GHz帯小型・高信頼CRFEの外観を写真1に示す．

このCRFEは，ファンによる強制空冷ではなく，ヒートパイプおよび外部放熱器により，Coolerの放熱を行うことで小型化を達成している．これは，PDC方式で用いられているOA-RAと同程度の体積であり，現時点では世界最小の大きさとなっている．

図9にCoolerで冷却される試料温度およびCoolerの温度特性を示す．図より所望の冷却特性が達成されていることが分かる．また，ファンが不要であ

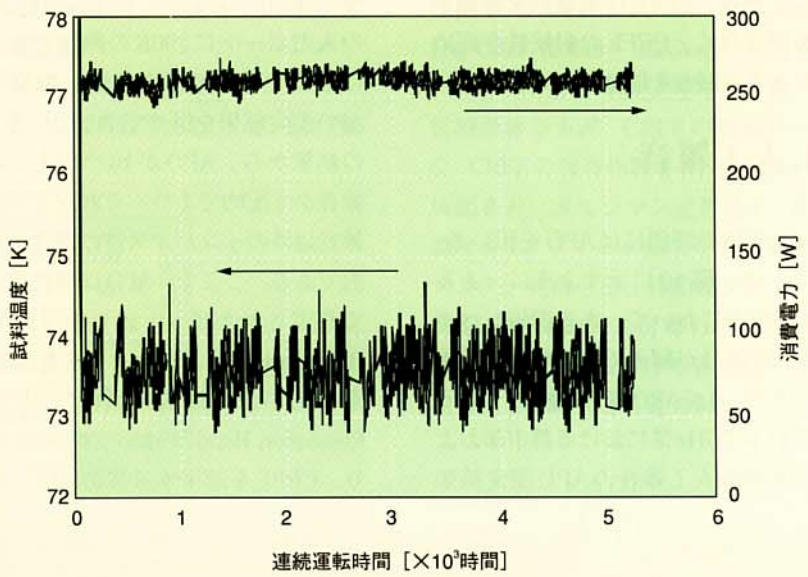


図7　Coolerの動作状況

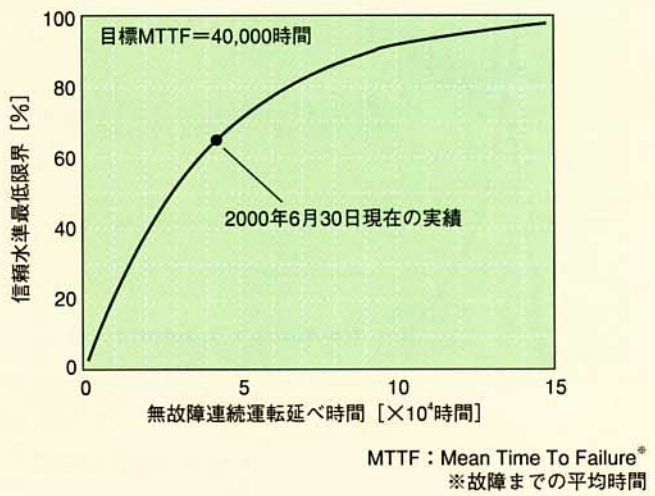


図8　Coolerの信頼性

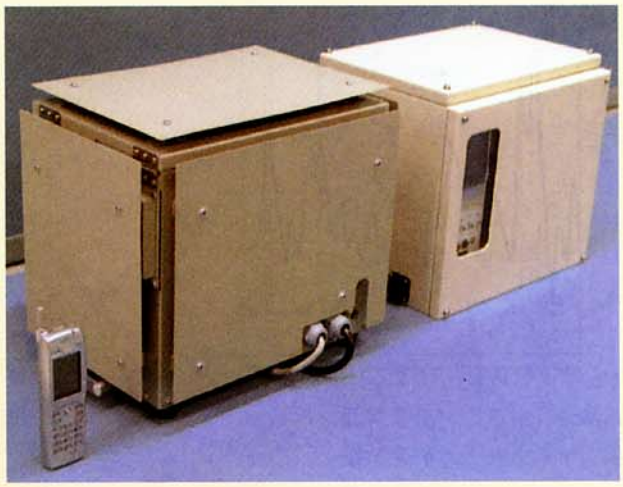


写真1　CRFE外観

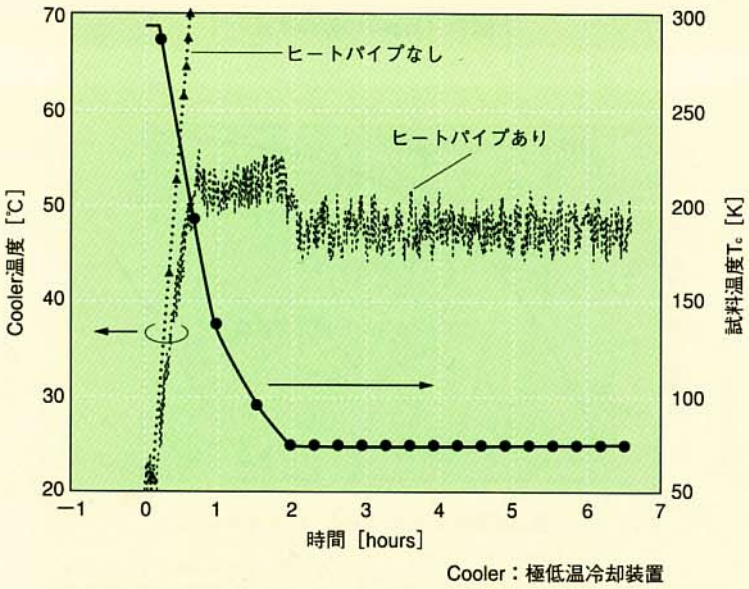
ることから，CRFEに通風口を確保する必要はなく，CRFEの耐候性を高めるとともに騒音を低減している．

4. 人工雑音

人工雑音の評価にはAPDを用いる．APDとは，図10に示すように，ある測定時間Tにおいて，ある閾値レベルa_pを測定信号が超えている時間率を表す．また，0≦APD≦1である．

図11に2GHz帯における都市部および郊外部の人工雑音のAPD測定結果を示す[6]．ここで，図12にはCRFEの入力ポートに290Kの熱雑音レベルに相当する終端器を接続した場合のAPD測定結果を併せて示している．この結果から，APDが10^{-4}以上では熱雑音が支配的であり，それ以下では熱雑音以外のインパルス性の雑音が支配的である．ここで，APDは検波器前段で測定されたビット誤り率（BER：Bit Error Rate）と見なせ，またAPD測定に用いた分解能帯域幅（RBW：Resolution Band Width）は1MHzであり，CRFEを適用する移動通信システムのIF周波数帯域幅も1MHzであると仮定している．ここで，移動通信システムにおいては強力な誤り訂正技術が採用されることを考慮すると，音声およびデータ伝送において要求される最小BERは10^{-3}であると考えられ，図11より10^{-3}に相当するAPDは熱雑音が支配的である．

我々は，2GHz帯以外に260MHz帯においてもHTSF適用の可能性を検討している[12]．しかし，260MHz帯における都市部および郊外部の人工雑音のAPDに関しては，図12に示すように2GHz帯とは異なり都市部および郊外部において熱雑音レベルよりも高い．また，APDが10^{-2}以下では，インパルス性の雑音が支配的となる[13]．したがって，260MHz帯においては人工雑音の影響が大きく，高感度化は困難であることが予想される．



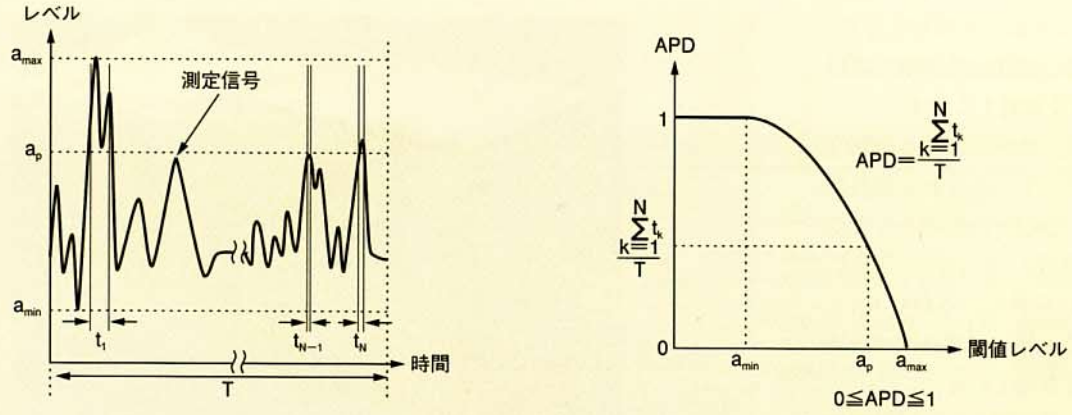
Cooler：極低温冷却装置

図9　試料温度およびCooler温度特性

5. サービスエリア拡大効果

ここでは，CRFEのシステム適用について，サービスエリアの拡大，具体的にはセル半径の拡大効果を考察する．低雑音化によるセル半径拡大効果を検討するため，伝搬減衰量L_pを次式で表す．

$$L_p = A(f,\ h_1,\ h_2)\ d^{\alpha} \qquad (2)$$



0≦APD≦1

APD：Amplitude Probability Distribution *

＊測定時間Tにおいて，ある閾値レベルa_pを測定信号が超えている時間率

図10　APDの定義

ただし，

f：周波数

h_1：基地局アンテナ高

h_2：移動局アンテナ高

d：基地局および移動局間距離（伝搬距離）

α：減衰係数

であり，L_pは真数である．αは自由空間伝搬損式の場合2であり，奥村・秦式[14]であれば$4.49-0.655\log(h_1)$である．

CRFE出力での希望波電力をP_r，受信機熱雑音をN，CRFEの増幅利得をG，CRFEの雑音指数をF，受信信号帯域幅をB，ボルツマン定数をk，絶対温度をT，フィーダ損失をL_f，基地局アンテナ利得をG_r，移動局アンテナ利得をG_t，移動局送信電力をP_tとすれば，CRFE出力における希望波対雑音電力比γは次式で与えられる．

$$\gamma=\frac{P_r}{N}=\frac{GG_rG_tP_t}{L_fkTBFL_p} \tag{3}$$

γをCRFE適用以前と以後で一定とすれば，低雑音化によりFが改善し，L_pが低減するため，セル半径拡大が可能となる．

CRFE適用以前および適用以後の雑音指数，伝搬損失量，セル半径をそれぞれF_1およびF_2，L_{p1}およびL_{p2}，d_1およびd_2とすれば，(3)式より次式が成り立つ．

$$\frac{GG_rG_tP_t}{L_fkTBF_1L_{p1}}=\frac{GG_rG_tP_t}{L_fkTBF_2L_{p2}} \tag{4}$$

また，

$$\begin{aligned}L_{p1}&=A\ (f,\ h_1,\ h_2)\ d_1{}^{\alpha},\\ L_{p2}&=A\ (f,\ h_1,\ h_2)\ d_2{}^{\alpha},\end{aligned} \tag{5}$$

であることから次式を得る．

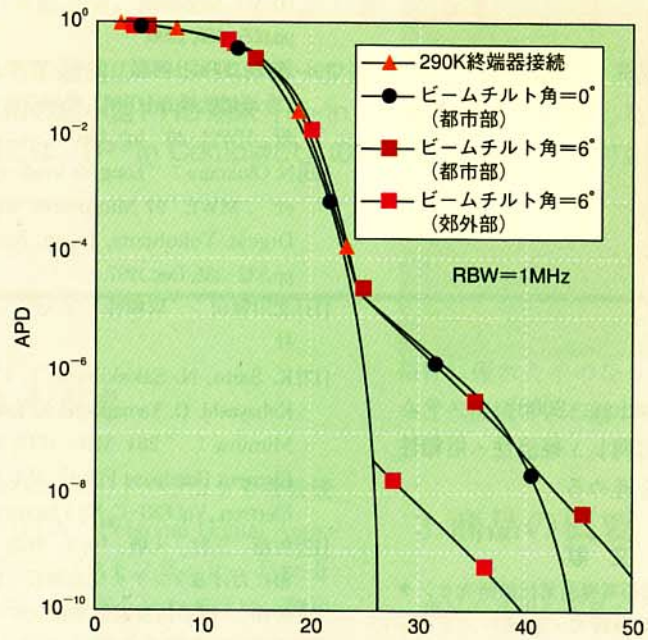
$$\Delta d=\left[\frac{1}{\Delta F}\right]^{\frac{1}{\alpha}} \tag{6}$$

ただし，

$$\Delta F=\frac{F_2}{F_1},\ \Delta d=\frac{d_2}{d_1} \tag{7}$$

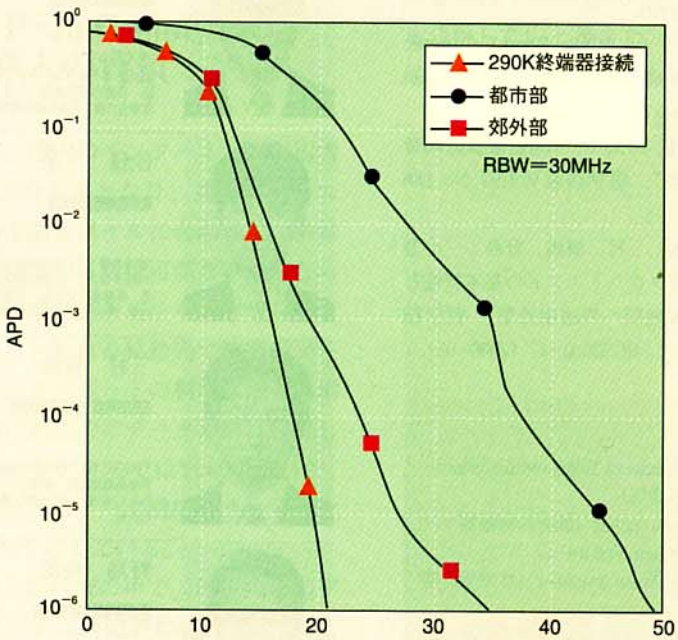
である．

ここで，ΔFおよびΔdはそれぞれ低雑音化による雑音指数改善量およびセル半径拡大比を示す．(6)式の減衰係数αをパラメータとしたときの計算結果を図13に示す．



APD：Amplitude Probability Distribution
RBW：Resolution Band Width（分解能帯域幅）

図11　APD測定結果（2GHz帯）



APD：Amplitude Probability Distribution
RBW：Resolution Band Width（分解能帯域幅）

図12　APD測定結果（260MHz帯）

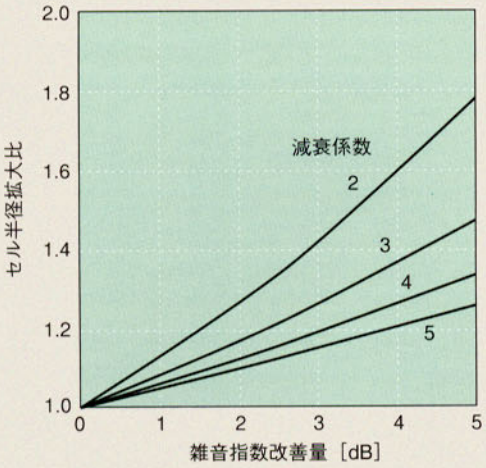


図13　セル半径拡大比

たとえば，減衰係数2，すなわち自由空間においては2.5dBの雑音指数改善によりセル半径を33.3％拡大できる．減衰係数の小さい方が，CRFEの低雑音化によるセル半径拡大効果は大きい．

6.あとがき

開発した2GHz帯CRFEについて，PDC方式用OA-RAと同程度の体積を達成するとともに，その基本構成および基本特性を述べた．また，受信感度改善量の関係を明らかにした．さらに，都市部および郊外部における人工雑音が信号伝送に及ぼす影響を実際のAPD特性を基に解析するとともに，CRFE適用によるサービスエリア拡大効果を評価した．

今後は，CRFEの次世代移動通信（IMT-2000：International Mobile Telecommunications-2000）システムなどへの適用に関し，経済性・信頼性について検討を進める．

文　献

[1] 財団法人国際超電導産業技術研究センター編："超電導研究・開発ハンドブック"，オーム社，1991.

[2] 社団法人低温工学協会編："超伝導・低温工学ハンドブック"，オーム社，1993.

[3] A. I. Braginski："Superconducting Electronics Coming to Market"，IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.9, No.2, pp.2825-2836, June.1999.

[4] T. Nojima："A 2GHz-Band Cryogenic Receiver Front-End"，1998 China-Japan Joint Meeting on Microwaves.

[5] 楢橋，三村，野島："2GHz帯極低雑音受信増幅器"，信学技報Vol.97 No.188 SAT97-58.

[6] 佐藤，鈴木，三村，楢橋，野島："小型極低温受信フロントエンドの基本特性と移動通信基地局への適用効果"，信学技報CS2000-1，RCS2000-12（2000-05）.

[7] 上林，大野，野島，村田，山田："ディジタル移動通信の基地局系装置技術"，NTT R&D VOL.40，No.10，pp.1309-1318，1991.

[8] Y. Abe, H. Kosuge and A. Nitahara："A Cryogenic Ultra-Low Noise 5-7GHz HEMT Amplifier"，proc. of 3rd APMC, pp.665-668, 1990.

[9] 武井，仰木，阿部，小平，宮澤，稲谷："冷却超低雑音HEMT増幅器"，信学技報，HW91-49，July.1991.

[10] N. Okumura："Long life small cryo-cooler"，MWE'97 Microwave Workshop Digest, Yokohama, Japan, No.PS4-5, pp.332-335, Dec.1997.

[11] 北川賢司："信頼性工学入門"，コロナ社.

[12] K. Saito, N. Sakakibara, Y. Ueno, Y. Kobayashi, D. Yamaguchi, K. Sato and T. Mimura："264 MHz HTS Lumped Element Bandpass Filter"，IEICE Trans. Electron., Vol.E83-C, No.1 January.2000.

[13] 佐藤，三村，大橋，川向，野島："VHF帯におけるアンテナ受信雑音の振幅確率分布"，電子情報通信学会ソサイエティ大会，B-5-113，1999.

[14] 桑原守二監修："ディジタル移動通信"，科学新聞社，1992.

用語一覧

APD：Amplitude Probability Distribution
BER：Bit Error Rate
CLNA：Crygenic Low Noise Amplifier（極低温低雑音増幅器）
Cooler：極低温冷却装置
CRFE：Cryogenic Receiver Front End（極低温受信フロントエンド）
HTSF：High Temperature Superconducting Filter（高温超電導フィルタ）
IMT-2000：International Telecommunications-2000（次世代移動通信）
LNA：Low Noise Amplifier（低雑音増幅器）
MTTF：Mean Time to Failure
OA-RA：Open Air Noise Amplifier（塔頂受信増幅器）
PDC：Personal Digital Cellular（ディジタル自動車電話方式）
RBW：Resolution Band Width（分解能帯域幅）